

# T型甚低频多调谐发射天线电容与电感研究

董颖辉<sup>1</sup>, 魏蛟龙<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学电子工程学院, 湖北武汉 430033; 2. 华中科技大学电子与信息工程系, 湖北武汉 430074)

**摘 要:** 甚低频天线理论认为, 采用多调谐方式, T型甚低频多调谐天线可以基本按比例增加天线电容, 在实际工程中常用五组或六组天线. 本文利用甚低频天线输入电抗的实测值, 计算了在不同频率下天线所呈现的等效电容和等效电感, 研究了T型甚低频发射天线的等效电容、电感、功率容量与天线组数及频率之间的关系. 研究表明T型甚低频多调谐天线的组数过多时, 每组天线实际贡献的电容呈减小趋势, 超过三组时对提高功率容量和带宽作用已不大, 这一结论对T型甚低频多调谐发射天线设计有重要指导意义.

**关键词:** 甚低频多调谐发射天线; 功率容量; 等效电容; 带宽

**中图分类号:** TN822+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2011)04-0981-04

## Study on the Capacitance and Inductance of T Model VLF Multiple Tuned Transmit Antenna

DONG Ying-hui<sup>1</sup>, WEI Jiao-long<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

2. Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** It is regarded generally according to VLF theory that the capacitance of T model multiple tuned VLF antenna will increase pro rata by the number of antenna groups, five or six groups are adopted usually. We analysed the equivalent capacitance and inductance by the metrical reactance of T model VLF single tuned VLF antenna and multiple tuned VLF antenna, and studied the relationship of its' equivalent capacitance, inductance, power capacity to its' frequency and antenna groups. The result shows that the capacity of each antenna group decreases gradually if the number of T model multiple tuned VLF antenna groups are overabundance, in fact the effect is limited to improve the power capacity and bandwidth when the antenna groups are more than three, it is an important guidance in the design of T model VLF multiple tuned transmit antenna.

**Key words:** multiple tuned VLF transmit antenna; power capacity; equivalent capacitance; bandwidth

## 1 引言

T型甚低频多调谐天线阵的电气性能十分复杂, 尤其是天线电容和电感, 是描述甚低频发射天线特征的重要参数, 有关甚低频发射天线的其它一些重要参数, 例如天线系统的功率容量、频带宽度和自谐振频率等, 都直接或间接地与天线电容、电感有关, 因此天线电容和电感是研究甚低频发射天线的基础. 对于甚低频多调谐天线, 其天线结构复杂, 体积大, 占地大, 地形不规则, 各天线单元间存在耦合, 得到其准确的天线电容和电感就更困难<sup>[1,2]</sup>. 目前甚低频发射天线的电参数均依靠天线静电容得到. 静电容可按照平行板电容器公式进行估算得到<sup>[3]</sup>;或在低频端(1kHz)用网络分析仪测量近似得

到<sup>[4]</sup>;或用矩量法计算, 矩量法仅对结构简单的单调谐天线计算准确, 对天线型式复杂, 地形复杂的多调谐天线, 建模难. 利用这些方法所得天线静电容不仅与实际值有误差, 且利用天线静电容来计算甚低频发射天线整个工作频段的其它参数具有一定的局限性. 对于甚低频发射天线的电感计算更为困难, 一般根据天线自谐振频率大致估算. 研究甚低频天线电容和电感与天线规模及频率的关系, 在工程上对甚低频天线的设计很有意义.

文中把甚低频发射天线作为整体, 利用天线输入电抗的测量值, 计算出甚低频天线(包括单调谐天线、多调谐天线一组、两组及五组)在不同频率下所呈现的等效电容和等效电感, 研究了多调谐天线的等效电容、电感、功率容量与天线组数及频率之间的关系.

## 2 天线等效电容、电感计算原理

天线输入阻抗反映天线整体固有电特性,可通过天线输入电抗测量值来计算天线等效电容和等效电感.

甚低频发射天线目前都采用直立形式的单调谐或多调谐方式,天线输入端的等效电路如图 1,由天线等效电容  $C$ ,等效电感  $L_e$ ,输入电阻  $R_m$  相串联,  $L_a$  为天线调谐电感.

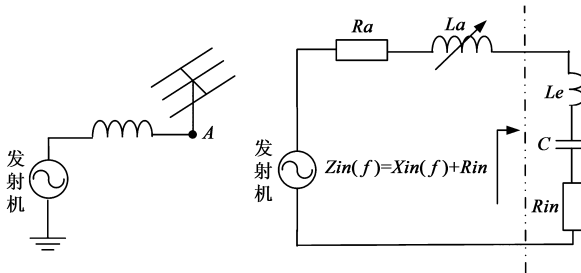


图1 甚低频发射系统及等效电路

天线输入电抗为

$$X(f) = j2\pi fL_e - \frac{1}{j2\pi fC} \quad (1)$$

在较窄频率范围内天线等效电容和电感近似不变,根据(1)式,若已知两个相距较近的频点  $f_1, f_2$  的电抗值  $X(f_1), X(f_2)$ ,则此范围内天线等效电容  $C$  和电感  $L_e$  按下式计算.

$$C = \frac{4\pi^2(f_2^2 - f_1^2)}{8\pi^3 f_1^2 f_2 X(f_2) - 8\pi^3 f_2^2 f_1 X(f_1)} \quad (2)$$

$$L_e = \frac{2\pi f_2 X(f_2) - 2\pi f_1 X(f_1)}{4\pi^2(f_2^2 - f_1^2)} \quad (3)$$

## 3 甚低频天线阻抗测量

甚低频发射天线是高  $Q$  电小天线,天线物理尺寸大,理论上可以用 FDTD 或矩量法计算其天线阻抗<sup>[5,6]</sup>,由于建模难度大,因此天线阻抗一般用实测值.但又由于天线上所感应的天电噪声均方值有时超过上千伏,因此实测天线阻抗很困难.以往采用阻抗电桥测量甚低频天线阻抗,由于测量信号会被噪声淹没,且在天电干扰严重情况下甚至使测量无法进行,因此电桥法无法保证测量的准确性.文中所用阻抗数据采用甚低频天线阻抗测量仪测得,该测量仪采用不同于电桥法的矢量谐振法<sup>[7]</sup>,它侧重于差值的分析与计算,在测量过程中始终保持测量信号压倒噪声,并保持很高的信噪比,且噪声抑制和处理是该测量仪的核心部分,具有很高的测量精度.天线阻抗测量时把天线与调谐线圈从图 1 中 A 点断开,在 A 点接入阻抗测量仪.

## 4 单调谐天线等效电容和电感

测量的频率范围为  $14k \sim 28kHz$ ,每隔  $2kHz$  测得一

个电抗值,根据测量值计算出相应频段内的  $C$  和  $L_e$ ,则整个测量范围内的等效电容和电感均值为  $\bar{C} = \sum C/n$  和  $\bar{L}_e = \sum L_e/n$ ,为了便于分析电容和电感随频率的变化,把  $\bar{C}$  和  $\bar{L}_e$  分别归一化为 1,则天线电容和电感随频率相对归一化  $\bar{C}$  和  $\bar{L}_e$  的变化如图 2,从图中得到,该天线的等效电容和电感在整个测量范围内没有明显增加或减少的趋势,均在均值附近变化.把  $\bar{C}$  和  $\bar{L}_e$  代入式(1),得到该天线的电抗计算曲线,与测量值进行比较,吻合较好,说明该单调谐天线的电容和电感在此频率范围内与频率无关.

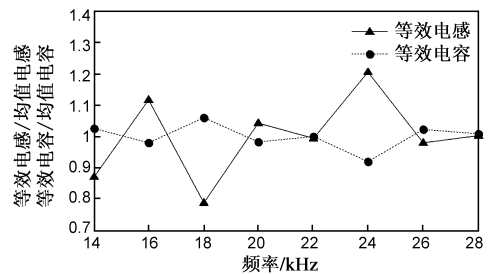


图2 某T型单调谐甚低频天线等效电容和电感

表 1 Cutler 和 NWC 天线测量和计算值比较

负载类型	$f(kHz)$	$X(\Omega)$	$C(\mu F)$ 计算值	$C_0(\mu F)$ 测量值 <sup>[7]</sup>
Cutler	40.2	0	0.1206	0.1239
六平顶负载	24	-35.4		
Cutler	40	0	0.0845	0.090
四平顶负载	24	-50.2		
NWC	33	0	0.1326	无
	20	38		

Cutler 天线和 NWC 天线是目前最具代表性的大型单调谐甚低频发射天线,Cutler 天线由南、北两付相同的单调谐结构构成,每付天线单独工作,分别由六个相同的平顶负载构成六边形天线阵,NWC 天线由一付六边形单调谐天线阵构成.文献[4]中给出 Cutler 南天线中的六个顶负载和四个顶负载分别工作时的和 NWC 天线工作时的阻抗测量值,根据式(2)、(3)分别计算出不同负载类型、不同天线的电容和电感,如表 1 所示,电容测量值为  $1kHz$  时的天线电容,Cutler 六平顶负载和四平顶负载的电容的计算结果分别为  $24k \sim 40.2kHz$  与  $24k \sim 40kHz$  范围内的均值,约为  $1kHz$  电容的 97% 和 94%,也就是说其天线电容随频率在此频率范围内基本不变.

## 5 多调谐天线等效电容和电感

T 型甚低频多调谐发射天线如图 3,当测量第 3 号天线单组输入阻抗时,开关  $K1, K2$  断开,3 号调谐线圈断开,1、2、4、5 组天线均接地,A 点接入阻抗测量仪.当测量第 4、5 两组天线输入阻抗时,开关  $K1, K2$  断开,4、5 号调谐线圈断开,1、2、3 组天线接地,B 点接入阻抗测

量仪.当测量全部五组天线输入阻抗时,开关  $K1, K2$  闭合时,所有调谐线圈均断开,  $A$  点接入阻抗测量仪.

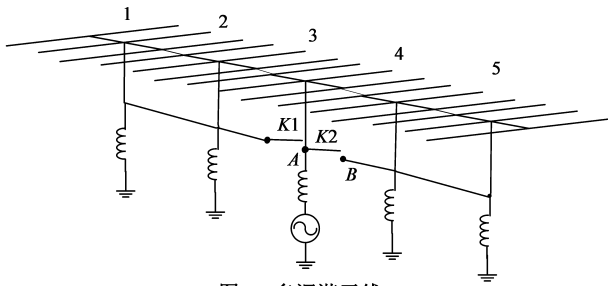


图3 多调谐天线

### 5.1 多调谐天线单组

测试频率为  $10\text{kHz} \sim 30\text{kHz}$ , 间隔为  $2\text{kHz}$ , 得到某 T 型多调谐天线不同频率单组工作时天线输入电抗, 根据式(2)、(3)计算出不同频率下的天线电容和电感. 同前述, 对整个测量范围内的均值电容  $\bar{C}$  和电感  $\bar{L}_e$  分别归一化, 则单组天线电容和电感随频率变化如图 4, 该天线单组工作时, 在所测频率范围内电容和电感与频率基本无关.

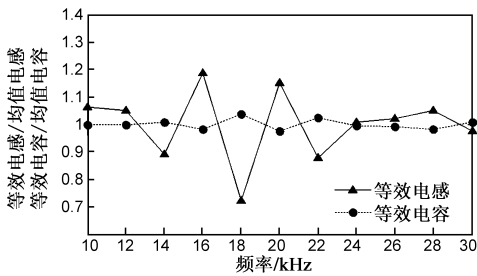


图4 T型多调谐甚低频天线单组等效电容和电感

### 5.2 多调谐天线两组

T型多调谐天线两组工作时, 测试频率为  $10\text{kHz} \sim 24\text{kHz}$ , 间隔为  $2\text{kHz}$ . 同理得到天线电容和电感随频率变化如图 5. 从图中得到, 频率低端 ( $18\text{kHz}$  以下),  $C$  和  $L_e$  随频率变化不大, 但频率高端, 随频率增加,  $C$  呈减小趋势,  $L_e$  呈增加趋势, 在所测频率范围 ( $10\text{kHz} \sim 24\text{kHz}$ ) 内, 高端比低端  $C$  约减少  $12\%$ ,  $L_e$  约增大  $33\%$ . 所以 T 型多调谐天线两组工作时在频率低端天线等效电容和电感基本固定, 随频率增加, 呈现电容减小, 电感增加的趋势.

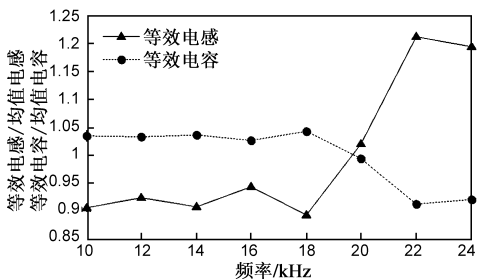


图5 T型多调谐甚低频天线二组等效电容和电感

### 5.3 多调谐天线五组

T型多调谐天线五组工作时, 间隔为  $2\text{kHz}$ , 测试频率为  $10\text{kHz} \sim 18\text{kHz}$ . 得到天线电容和电感随频率变化如图 6. 在所测整个频段内, 高端比低端电容约减少  $24\%$ , 电感约增大  $40\%$ . 多调谐天线五组工作时天线电

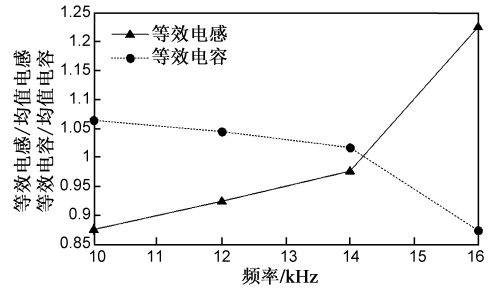


图6 T型多调谐甚低频天线五组等效电容和电感和电感随频率变化较大, 且频率越高变化越大.

## 6 多调谐天线功率容量和带宽分析

多调谐天线单组、两组及五组工作时相对单组电容和电感的变化如图 7, 图 8 所示. 单组天线在所测频率范围  $10 \sim 30\text{kHz}$  内天线电容和电感基本为定值. 两组工作时, 电容和电感均比单组有所增加, 频率低端, 电容约为单组的  $1.8$  倍, 电感为单组的  $1.3$  倍, 随频率增加, 到  $18\text{kHz}$  时电容开始降低, 电感开始增加,  $22\text{kHz}$  时电容降低为单组的  $1.6$  倍, 电感增加到单组的  $1.8$  倍. 五组工作时, 整个测量频率范围内电容和电感均有明显变化,  $10\text{kHz}$  时电容为单组的  $2.55$  倍, 电感为单组的  $2.5$  倍,  $16\text{kHz}$  时电容和电感分别为单组的  $2.1$  和  $3.5$  倍. 单调谐天线电容和电感随频率变化不明显, 多调谐天线多组工作时电容和电感随频率发生明显变化, 且天线组数越多, 这种变化越大. 设计甚低频多调谐天线的目的在于增加天线电容, 从而提高天线的功率容量和带宽. 功率容量和带宽分别表示为

$$P_{\max} = 6.95 \times 10^{-13} V_{t\max}^2 C^2 h_e^2 f^4 / \eta_a \quad (4)$$

$$B_{3\text{dB}} = \frac{1.11 \times 10^{-7} h_e^2 f^4 C}{\eta_a} \quad (5)$$

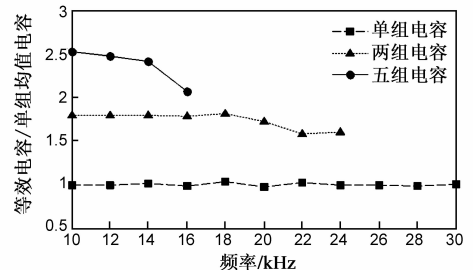


图7 多调谐天线相对单组天线电容

其中  $V_{\max}$  是天线顶端绝缘子所能承受的最大耐压,  $h_e$  为天线有效高度,  $\eta_a$  为天线效率,  $C$  为天线根部电容,  $f$  为工作频率.

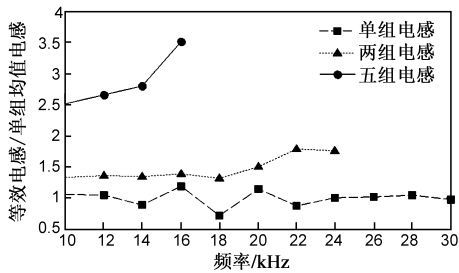


图8 多调谐天线相对单组天线电感

根据多调谐天线单组、两组及五组工作时电容、电感计算结果表明,当组数不大于2组时,每组天线在频率低端所贡献的电容接近于单组电容,可达到提高功率容量和带宽的目的,在频率高端,每组贡献的电容越来越小,当组数大于3组时,每组贡献的电容远小于单组电容,5组工作时的电容仅为单组工作的2倍多,对提高功率容量和带宽意义不大。因此利用增加天线组数来提高天线功率容量和带宽时,天线组数过多,不仅提高功率容量和带宽的效果不明显,而且由于天线电感大幅提高,大大降低了天线自谐振频率,增加了天线的调谐难度。

## 7 结论

通过对甚低频单调谐及多调谐发射天线的电容和电感分析,得出T型单调谐天线和T型多调谐天线单组工作时的等效电容和电感在工作频率范围内基本不随频率变化。T型天线多组工作时可提高天线的电容,同时天线电感也在增加,这样在增加功率容量和带宽的同时也大大降低了天线的自谐振频率,影响天线的稳定工作。随着天线组数增多和工作频率的升高,每组天线所贡献的电容就越小,因此在甚低频天线工程设计中,为了提高能效比,应尽量采用单调谐方式,采用T型多调谐方式时,天线组数不宜过多。

## 参考文献

- [1] 邹艳林,刘其中,纪奕才. T形天线的研究[J]. 电波科学学报,2005,20(3):544-547.  
Zou Yan-lin, Liu Qi-zhong, Ji Yi-cai. Characteristics simulation of T antennas located in a valley[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(30): 544-547. (in Chinese)

- [2] 纪奕才,贺秀莲,张晓刚等. 架设在凹形接地面上倒L天线的研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2003, 30(4): 506-509.  
Ji Yi-Cai, He Xiu-Lian, Zhang Xiao-Gang, et al. Analysis of the inverted L antennas mounted on a conducting concave surface[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2003, 30(4): 506-509. (in Chinese)
- [3] 柳超,梁玉军,刘其中,等. 甚低频T型天线阵地网损耗电阻的分析与计算[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2008, 35(6): 1026-1030.  
Liu Chao, Liang Yu-jun, Liu Qi-zhong et al. Analysis and calculation of ground loss resistance for VLF T-type antenna array with the ground screen[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2008, 35(6): 1026-1030. (in Chinese)
- [4] Hansen P, Chavez J. VLF Cutler; September 1997 Four-Panel Tests; RADHAZ and Field Strength Measurement[R]. TECHNICAL REPORT 1761, January 1998.
- [5] 李朝伟,吕善伟. 一种基于FDTD的简单有效的天线阻抗计算方法[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1635-1637.  
Li Chao-Wei, Lue Shan-Wei. FDTD calculation of antenna impedance by a simple and efficient method[J]. Acta Electronica Sinica. 2001, 29(12): 1635-1637. (in Chinese)
- [6] 任仪,聂在平,赵延文,等. 矩量法中阻抗矩阵的稀疏化研究[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2354-2358.  
Ren Yi, Nie Zai-ping, Zhao Yan-wen et al. Sparsification of the impedance matrix in MoM[J]. Acta Electronica Sinica. 2007, 35(12): 2354-2358. (in Chinese)
- [7] 蒋宇中,张曙霞,韩郁. 强噪声环境下测量甚低频天线阻抗方法研究[J]. 电波科学学报, 2004, 19(5): 544-547.  
Jiang Yu-zhong, Zhang Shu-xia, Han Yu. Measurement of VLF transmitting antenna impedance in intensive atmospheric noise [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(5): 544-547. (in Chinese)

## 作者简介



董颖辉 女, 1971年出生于陕西户县, 1992年毕业于解放军信息工程大学电子工程系, 1999年进入海军工程大学通信工程系, 博士生。主要从事信号处理及天线领域研究工作。  
E-mail: jgdyh@sina.com

