

## 机载隐蔽式短波天线设计

王乃志\* 李建周 许家栋  
(西北工业大学电子信息学院 西安 710129)

**摘要:** 机载天线是飞机导航、通信等系统的重要组件; 实现远距离通信主要依靠机载短波天线。新型复合材料的使用以及飞机尺寸的增大, 是国际飞机发展的潮流。针对这一问题, 该文利用电小天线及传输线相关理论设计一种新型大型飞机机载隐蔽式短波天线, 设计过程中使用电磁仿真软件 Ansoft HFSS 建模计算天线输入阻抗及方向图并优化天线尺寸; 在此基础上, 制作缩比模型并在微波暗室中对其进行实测, 所得数据与仿真结果相符。除此之外, 对天线的阻抗匹配及效率进行分析并给出计算结果。计算及测试结果表明, 此天线可与天线调谐系统(例如 KHF950)良好调谐, 方向图为水平全向, 符合应用要求, 可用于整个机身或仅垂尾为复合材料的大型飞机。

**关键词:** 机载短波天线; 阻抗; 全向; 效率; 调谐

**中图分类号:** TN822+.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2011)02-0504-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2010.00502

## Investigation of an Airborne Concealed HF Antenna

Wang Nai-zhi Li Jian-zhou Xu Jia-dong

(School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** As an important module of aircraft navigation and correspondence systems, the remote distance communication depends mainly on the airborne High Frequency (HF) antenna. With the use of new materials and larger size of aircraft, HF antennas tend to be problematic for a number of reasons. In this paper, a novel HF antenna is designed which could be used on a large aircraft. It can be located on the front edge of the vertical wing and is well conformal with the configuration of the plane without degenerating the reasonable shape of the aircraft. Based on the simulation utilizing the software Ansoft HFSS, the impedance and radiation pattern of the antenna are calculated, and based on the simulation results, impedance matching and efficiency of the antenna are analyzed. A scaling test-piece has been made to authenticate the simulation results. It can be tuned satisfactorily with transceivers such as the KHF950 through the band. All indicate that this kind antenna can be used for remote communication on aeroplane.

**Key words:** Airborne HF antenna; Impedance; Omni-directional; Efficiency; Tune

### 1 引言

短波是唯一不受网络枢纽和有源中继体制约的远程通信手段, 短波电台是现代大型飞机的重要通信设备, 尤其是在远距离、超视距通信等方面起着重要作用<sup>[1]</sup>。短波天线<sup>[2]</sup>作为短波通信的前端, 在短波通信系统中有着举足轻重的地位。随着国内航空航天事业的飞速发展, 对机载设备的要求也越来越高; 机体尺寸增大与复合材料的使用这一新的使用条件, 使现有机载短波天线难以满足大型运输机实现远距离空地之间通信的要求。

机载短波天线频率范围为2-30 MHz, 为了达到良好的通信效果, 需要达到以下要求: 整个频段内

水平方向图为全向且增益为-20 dBi以上; 输入阻抗实部均大于 $0.1 \Omega$ 且阻抗均满足天线调谐系统调谐范围。而若想使其不突出于机体之外, 天线尺寸将受限于机体尺寸, 致使此类天线为电小天线, 电小天线性能近似于电偶极子或小电流环, 其辐射电阻远小于输入电抗且其方向图几乎与电小天线尺寸无关<sup>[3]</sup>, 在 2-6 MHz 频段阻抗实部很难达到 $0.1 \Omega$ , 且调谐后效率极低。

现有机载隐蔽式短波天线主要有钢索天线、缺口天线、回线天线、套筒天线等。钢索天线<sup>[4,5]</sup>是机头至机尾拉一根钢索形成, 此类天线易结冰且影响机体气动性能。缺口天线<sup>[4]</sup>是在金属机身非受力位置切开一个口子馈以高频能量来激励整个机体形成, 此种天线设计时位置因素考虑较多, 且不能用于复合材料机身的飞机。回线天线<sup>[5]</sup>可以视为矩形环形天线与缺口天线的结合, 一般设置在飞机垂尾前沿,

2010-05-18 收到, 2010-09-02 改回

陕西省自然科学基金(2009JM8001-2)资助课题

\*通信作者: 王乃志 silliamwenz@hotmail.com

可与飞机共形, 但低频阻抗实部极小导致效率低下, 且阻抗变化范围大, 匹配困难。套筒天线<sup>[6]</sup>低频段呈容性, 使用感性调谐导致天线效率低下。

本文利用电小天线及传输线相关理论设计一种新型机载隐蔽式短波天线。此回形天线尺寸较小, 仅有280 cm×50 cm, 可竖直安放于飞机垂尾内部(如图1所示), 不破坏飞机气动性能, 实现与机体共形; 在2-30 MHz频段内输入阻抗实部均大于0.1Ω, 且低频段电抗呈感性, 容性调谐后效率较高, 与天线调谐系统可实现良好调谐; 天线水平辐射方向图为全向, 各向增益均匀且均在-20 dBi以上。该天线可用于机身蒙皮为复合材料或垂尾为复合材料的大型飞机进行空地远距离短波通信。

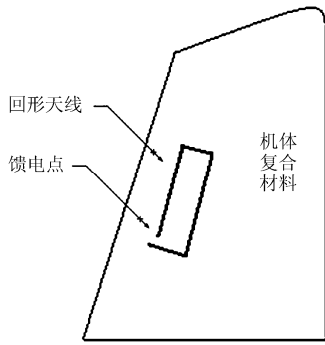


图1 回形天线飞机垂尾安放位置

## 2 理论分析

机载短波天线工作频率范围为2-30 MHz, 较低的工作频率以及飞机机体尺寸的限制, 使其尺寸电长度仅为低频段波长的几十分之一, 属电小天线; 且其工作频率范围达15个倍频程, 难以利用宽带调谐的方法使其在整个频率范围内达到良好匹配。此类天线需利用天线调谐系统, 在不同的使用情况下利用窄带匹配的方法在某一频点进行自动调谐。

根据传输线理论, 天线尺寸小于四分之一波长时, 若终端开路则呈容性, 如前文中提到的机载短波套筒天线; 若终端短路, 则天线呈感性。天线在低频段阻抗实部很小, 而用容性调谐利用跨接电容的方法可增大其阻抗实部, 提高效率, 具体原理如图2所示, 其中图中 $Z_L$ 为天线输入阻抗,  $C$ 为跨接可调电容,  $L$ 为可调电感,  $T$ 为变压器。设 $Z_L = R + jX$ :

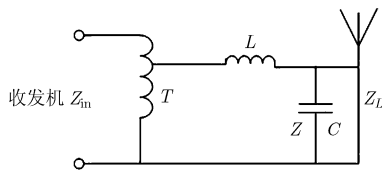


图2 天线调谐原理

若天线呈感性, 则跨接电容后阻抗 $Z$ 为

$$Z = \frac{\frac{1}{j\omega C}(R + jX)}{\frac{1}{j\omega C} + (R + jX)} = \frac{(X - jR)}{\omega CR + j(\omega CX - 1)} = \frac{R + j(X - \omega CR^2 - \omega CX^2)}{(\omega CR)^2 + (\omega CX - 1)^2} \quad (1)$$

当 $C$ 与 $Z_L$ 良好调谐时,  $Z$ 的虚部变的很小, 即

$$j(X - \omega CR^2 - \omega CX^2) = j\Delta \quad (2)$$

其中 $\Delta$ 为很小的正数。将式(2)等价变形为

$$\omega C - X/(R^2 + X^2) = \Delta \quad (3)$$

则

$$Z = \frac{R(R^2 + X^2) - j\Delta(R^2 + X^2)}{R^2 + \Delta^2(R^2 + X^2)^2} \quad (4)$$

设天线 $Q$ 值为

$$Q = X/R \quad (5)$$

则阻抗实部

$$Z_{re} = R \frac{1 + Q^2}{1 + \Delta^2 R^2 (1 + Q^2)^2} \quad (6)$$

电小天线的 $Q$ 值一般远大于1, 由式(6)可知天线在跨接合适电容后阻抗实部相应增大为 $(1 + Q^2)/[1 + \Delta^2 R^2 (1 + Q^2)^2]$ 倍。

可调电感 $L$ 用来抵消 $Z$ 的虚部:

$$X_L = \frac{\Delta(R^2 + X^2)^2}{R^2 + \Delta^2(R^2 + X^2)^2} \quad (7)$$

变压器 $T$ 为可调变压器, 若采用特性阻抗为50Ω同轴线的馈电, 则其变比为

$$T = \sqrt{\frac{\Delta(R^2 + X^2)^2}{50[R^2 + \Delta^2(R^2 + X^2)^2]}} \quad (8)$$

设天线的辐射效率为 $\eta$ , 变压器 $T$ 与可调电感 $L$ 的品质因数为 $Q_T, Q_L$ ,  $T$ 与 $L$ 自身的电阻值可表示为 $R_T = X_T/Q_T, R_L = X_L/Q_L$ , 则整个天线系统的效率为

$$\begin{aligned} \eta_{s1} &= \eta \frac{Z_{re}}{T^2 R_T + R_L + Z_{re}} \\ &= \eta (T^2 X_T / Q_T Z_{re} + X_L / Q_L Z_{re} + 1)^{-1} \\ &= \eta (X_T / 50 Q_T + \Delta / Q_L R + 1)^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $X_T$ 一般为传输线特征阻抗的若干倍, 在此处为50Ω的若干倍。

若天线呈容性, 则无需并联跨接电容, 且天线的效率为

$$\eta_{s2} = \eta (X_T / 50 Q_T + Q / Q_L + 1)^{-1} \quad (10)$$

$Q$  为天线品质因数。

由以上推导可知, 天线呈感性时, 除受阻抗实部的影响外, 减小  $\Delta$  (提高跨接电容与天线的谐振质量), 提高变压器与电感的  $Q$  值, 天线系统的效率会明显提升; 呈容性时, 天线系统效率主要与变压器、调谐电感及天线的品质因数  $Q$  有关。

依据以上推理, 结合此电小天线低频端(2~10 MHz)阻抗实部较小的特点, 本文设计天线采用终端短路的结构, 利用跨接电容调谐提高网络效率。

### 3 天线结构及建模仿真

#### 3.1 天线结构及优化尺寸

天线结构及电磁仿真软件 HFSS 建模图形如图 3(a)所示。受限于飞机垂尾尺寸, 天线长度、宽度、高度各不能超过 300 cm, 50 cm, 50 cm。使用 HFSS 对模型输入阻抗及方向图进行仿真计算并优化尺寸, 发现天线各部分尺寸对其参数影响情况如下:

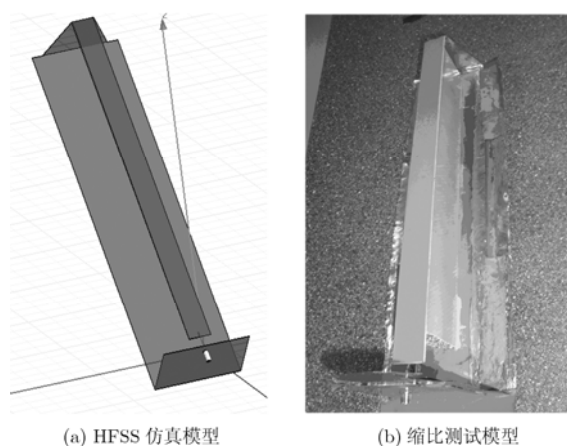


图3 天线基本结构

(1) 天线长度在达到 280 cm、高度达到 40 cm 后, 继续加长或增高对其阻抗实部影响不大, 但会使低频段感抗增大, 而天线感抗过大会使其超出天线调谐系统的调谐范围, 应控制长度和高度;

(2) 减小窄面宽度能够提高低频端阻抗实部, 但天线感抗增加更加剧烈;

(3) 天线并联谐振频率(20 MHz)前后最大辐射方向由  $\theta$  向变为  $\phi$  向, 其他频点方向图在随尺寸的改变几乎不发生变化。

利用 HFSS 软件进行优化的目标是在天线尺寸不超出 300 cm × 50 cm × 50 cm 的范围前提下对天线进行 2~30 MHz 分段扫频计算, 通过对改变宽面、窄面以及高度尺寸的计算结果的对比, 取得输入阻抗实部尽可能大, 而阻抗虚部尽可能小的天线尺寸。

经过以上分析及仿真计算, 得到天线最佳性能

时的尺寸为: 长度 280 cm, 宽面宽度 48 cm, 窄面宽度 12 cm, 高度 40 cm。

#### 3.2 仿真结果可靠性验证

天线原始尺寸过大, 可利用依据仿真优化结果的缩比模型来验证其仿真计算的可靠性。制作八分之一尺寸缩比模型(图 3(b)所示)利用安捷伦矢量网络分析仪(E8363B)对其进行阻抗测试, 所得结果如图 4 所示(由于测试天线为缩比天线, 其工作频率对应缩比比例作相应变化, 即缩比模型的工作频率为 16~240 MHz)。

将缩比模型放置在缩比飞机模型垂尾, 并在长宽高为 25 m × 20 m × 20 m 的微波暗室中测试天线水平方向图。图 5 与图 6 分别为缩比模型工作于 24 MHz 和 224 MHz (对应于原始尺寸 3 MHz 与 28 MHz) 的仿真方向图与实测方向图的对比。

图 4(a)、图 4(b)对比可以看出, 原始尺寸天线与缩比模型天线仿真阻抗结果基本相同, 可用缩比天线来验证原始尺寸天线的仿真可靠性。由图 4(b)、图 4(c)可以看出, 缩比模型仿真阻抗与实测阻抗良好吻合, 阻抗仿真结果可信。该天线在工作频段内低频段呈感性, 高频段呈容性, 在 21 MHz 附近达到谐振; 实测中发现低频段阻抗实部略高于仿真值, 这是由于建模仿真时视金属为理想导体, 而实际金属具有损耗。

由图 5, 图 6 可以看出, 天线水平方向图仿真与测试结果相符。在整个工作频段内, 此天线的方向图均无深陷点, 保持良好的全向性。在低频段增益能够保持在 -20 dB 以上, 且随着工作频率的升高, 增益逐渐增大, 在 150 MHz 至 240 MHz 频段(对应于原始尺寸天线 20~30 MHz)内, 天线增益大于 0 dB; 机载短波电台发射一般采用增大发射功率的方式来补偿电小天线增益低的不足, 其发射功率一般为 150 W 以上, 应用此天线的机载短波电台系统发射功率为 400 W。

### 4 天线效率分析

天线的辐射效率一般不低于 80%, 这是由天线的有限电导决定的。根据上面推导得到的天线呈感性和呈容性时的效率公式(9), 式(10), 取  $\eta = 85\%$ ,  $X_T/50 = 50$ ,  $Q_T = Q_L = 100$ ,  $\Delta$  分别取 0, 50, 由仿真数据所得效率及跨接电容大小如表 1 所示。

计算结果显示, 低频段呈感性的电小天线利用容性调谐其效率远高于呈容性时采用感性调谐<sup>[1,6]</sup>的

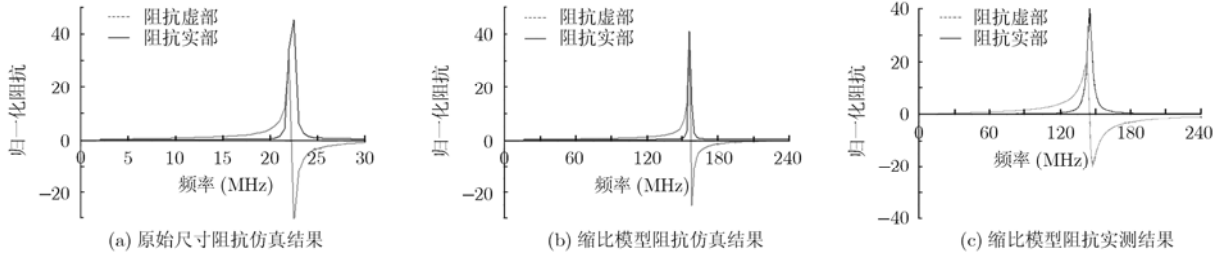


图 4 阻抗仿真及缩比模型实测结果

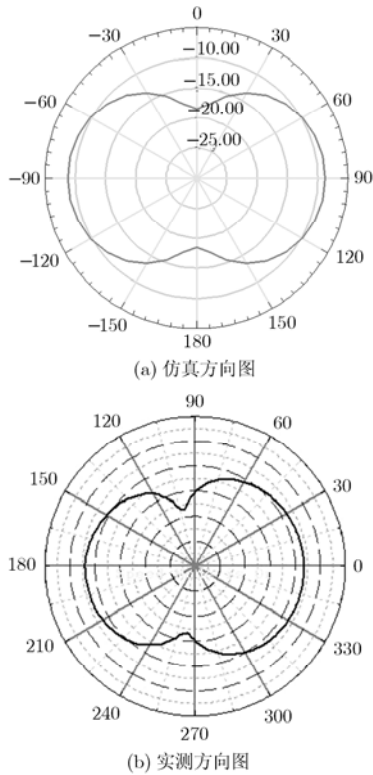


图5 24 MHz仿真与实测水平方向图

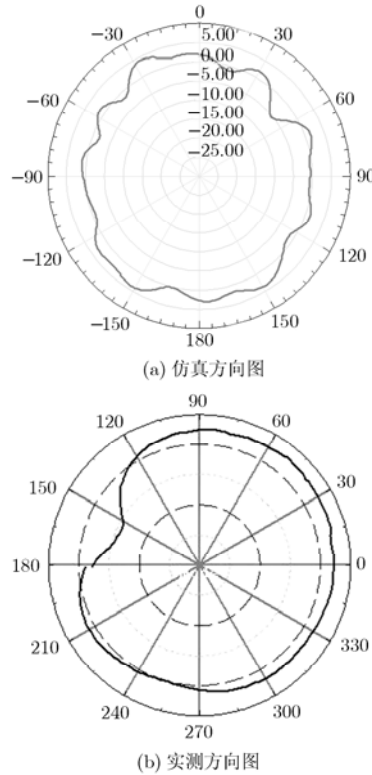


图6 224 MHz仿真与实测水平方向图

效率, 且其受调谐电容与天线形成的并联回路的谐振质量有很大关系。以KHF950电台为例, 与之配套的调谐系统最大能提供4025 pF的电容, 所以天线在整个2 MHz到30 MHz频段内均能实现调谐。

表1 仿真数据所得效率及跨接电容值

频率 (MHz)	仿真阻抗 ( $\Omega$ )	电容 (pF)	效率 (%) ( $\Delta=0$ )	效率 (%) ( $\Delta=50$ )
2	$0.13+j 21.7$	3667	56.7	16.0
6	$0.21+j 37.9$	699	56.7	20.4
10	$0.45+j 78.8$	202	56.7	29.0
14	$1.14+j 177.2$	64	56.7	44.7
18	$90.6+j 942.8$	9.4	56.7	56.5
22	$9.2-j 702.4$	0	37.6	37.6
26	$7.1-j 136.0$	0	50.2	50.2
30	$10.9-j90.9$	0	54.9	54.9

### 5 结论

本文仿真设计一种新型机载隐蔽式短波天线, 结构简单, 可与机身实现共形; 经实测验证, 仿真结果可信; 在整个工作频段 2-30 MHz 内均可与机载短波电台(如 KHF950 电台)实现良好调谐, 且此天线方向图均匀, 效率及增益相对较高, 工作性能良好, 可用于现代大型飞机机载短波电台实现短波通信。

### 参考文献

[1] 张国强. 机载短波电台天线的研究 [D]. [硕士学位论文], 西北工业大学, 2003.  
Zhang Guo-qiang. Study of airborne antennas[D]. [MA. dissertation], Northwestern Polytechnical University, 2003.  
[2] 张志刚, 柳超, 王跃平. 小型化高效率的宽带短波天线[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(7): 1776-1778.

- Zhang Zhi-gang, Liu Chao, and Wang Yue-ping. Small size and high efficiency HF broadband antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(7): 1776-1778.
- [3] Stutzman L and Thiele A. *Antenna Theory and Design (Second Edition)*[M]. New York, Chichester: John Wiley & Sons, 2006: 51-75.
- [4] Fujimoto K and James J R. *Mobile Antenna Systems Handbook*. Artech-House, 1994.
- [5] 郭陈江, 丁君等. 机载隐蔽式短波天线研究[J]. *微波学报*, 2004, 20(3): 66-68.
- Guo Chen-jiang and Ding Jun, *et al.* Research on airborne short wave antenna[J]. *Journal of Micromaves*, 2004, 20(3): 66-68.
- [6] Cummings P. Design and analysis of a pattern selectable airborne HF antenna[C]. *IEEE/ACES International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics*, 2005: 499-502.
- 王乃志: 男, 1986 年生, 博士生, 研究领域为共形天线、天线综合等.
- 李建周: 男, 1972 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究领域为计算电磁场、星载天线等.
- 许家栋: 男, 1948 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为计算电磁理论、微波测量、雷达系统、微波通信等.