

# 民用飞机高频通信系统阻抗匹配技术研究

赵 健\*

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

**摘要:** 高频通信系统,又称为短波通信系统,其工作频段为 2.000 0~29.999 9 MHz。在通信方式和数据处理等软件设计中,高频通信系统同其他通信子系统一样走在科技发展的前沿,但诸如硬件设计尤其是天线设计和阻抗匹配的研究却很少,应用到民用飞机上的短波通信技术的研究更是少见。但为了实现向负载的最大传输功率以及改善噪声系数,阻抗变化又是十分必要的。首先介绍了高频通信系统的设备组成,然后重点介绍了系统的阻抗匹配流程以及天线调谐器内部电路组成,并简要介绍了阻抗匹配的工作原理和设计思路,旨在对高频通信系统的指标提升提供参考。

**关键词:** 高频通信;阻抗匹配;史密斯圆图;天线调谐器

中图分类号: V243.1

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

高频通信系统在民用和军用领域是非常重要的系统,中、美、欧、俄、日等对机载、车载、舰载高频天线的研究也从未停止<sup>[1]</sup>。在研究过程中,阻抗变换和阻抗匹配是通信电路设计的一个重点。在实际过程中,确实出现过因在某个频率点无法实现阻抗匹配而引起发射机无法调谐的问题<sup>[2]</sup>。

受到天线调谐器内有损网络中无源器件的插入损耗的影响,接收机的接收功率常常不尽如人意,在设计过程中也会要求各模块与传输线进行良好的匹配从而提高系统工作效率,为了实现上述要求,就需要进行阻抗匹配电路设计,短波通信系统最重要的一个特征就是驻波比 VSWR<sup>[3]</sup>。

本文旨在通过介绍高频通信系统的阻抗匹配原理和设计方案对高频通信系统的指标提升提供参考。

## 1 高频通信系统特点

高频通信系统是一种远距离通信系统,适用于几十到几百公里之外的通信,并可以通过天波和地

波两种方式传输。

地波传输的优点是受天气影响小,缺点是损耗随频率升高而增大;天波传输的优点是传输距离远,但缺点是受昼夜、季节、天气、温度、电离层活跃程度影响较大。

高频通信系统同时还是延程运行(extended operations,简称 ETOPS)的重要系统之一,其失效或故障会对 ETOPS 飞行或者 ETOPS 改航期间继续安全飞行和着陆产生不利影响。

天线的尺寸由中心工作频率决定,一般设计天线的尺寸与天线工作频率的关系如式(1)所示。

$$L = \frac{c}{f} \quad (1)$$

式中: $L$ 为天线长度,单位为 m; $c$ 为光速,单位为 m/s; $f$ 为天线工作频率,单位为 Hz。

若按照一般设计要求,所设计的高频通信系统天线将达到几米到几十米长,显然不满足使用要求。

即使随着尾帽天线<sup>[1]</sup>、并馈天线等新式天线的兴起,依旧需要天线调谐设备来进行阻抗匹配,从而实现在 2.000 0~29.999 9 MHz 频段内的阻抗匹配,用来改善高频通信系统中信号噪声较大等问题。

\* 通信作者. E-mail: zhaojian6471@163.com

引用格式: 赵健. 民用飞机高频通信系统阻抗匹配技术研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(2):75-80. ZHAO J. Research on impedance matching technology of HF communication system of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(2):75-80(in Chinese).

高频通信系统的设备组成如图 1 所示。



图 1 高频通信系统组成

## 2 天线调谐设备设计

### 2.1 天线调谐设备工作流程

高频天线调谐设备可用于实现高频天线与  $50\ \Omega$  特性阻抗传输线之间的阻抗匹配,以及接收或发射高频电磁波。

为了提高系统的可靠性,在民用飞机上常常需要安装两套高频通信系统。系统或处于接收状态,或处于发射状态。当系统处于接收状态时,天线调谐设备不进行调谐;当系统进行发射时,收发机和天线调谐设备的工作流程如图 2 所示。

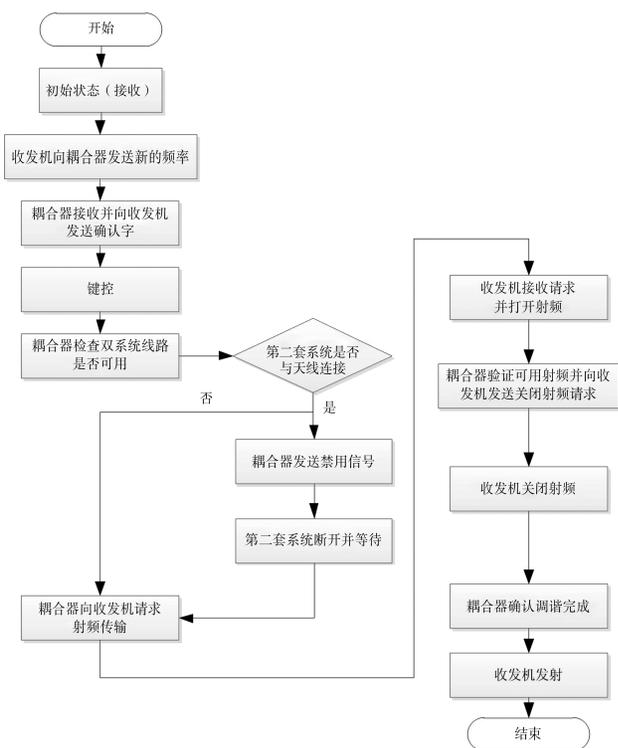


图 2 天线调谐设备工作流程

在图 2 中,收发机频率是由座舱内专用高频无线电控制面板通过 ARINC 429 总线控制的,然后由收发机发送至天线调谐设备,在接收到频率改变后,天线调谐设备应先完成简单的启动工作,该时

长不应超过  $1\ \text{s}$ 。键控指的是频率切换后接收到按压发话按钮信号。整个双系统线路断开或禁用逻辑可以使用一颗二极管实现。

天线调谐器的调谐时间不应超过  $7\ \text{s}$ ,收发机应当监测调谐完成的时间,还应当监测调谐是否成功。每一次调谐完成后,天线调谐设备都应当储存本次调谐中所有元器件的数值信息,使得下次使用相同频率时能进行快速调谐,该功能称为快速调谐。

### 2.2 天线调谐设备组成

天线调谐设备在物理上一端与收发机相连,另一端与天线相连,需要实现整个系统的阻抗匹配工作。

考虑到天线调谐设备的物理连接关系和功能要求,天线调谐设备应由机箱组装件、射频阻抗匹配网络、阻抗测量传感器电路、控制电路、电源电路五部分组成。

机箱组装件的作用是将所有子组件进行装配,并对电源电压谐波和射频干扰进行抑制。

射频阻抗匹配网络由继电器、电容器组和电感器组成,继电器用来控制电容和电感的连接状态,电容和电感器用来使整个网络匹配到纯电阻状态。

阻抗测量传感器电路由微处理器和阻抗测量系统组成,用来监控与阻抗匹配相关的所有信息。阻抗测量系统可以探测到整个系统的电阻、相位和驻波比信息,并将上述信息转为数字信号的格式传输到微处理器。

控制电路由微处理器、随机存取存储器 and 电擦除可编程存储器 (electrically erasable programmable memory, 简称 EEPROM) 组成。随机存取存储器用来存储一些临时变量数据,EEPROM 用来存储天线调谐设备历史故障信息等。

天线调谐设备由高频收发机进行供电,电源为  $115\ \text{V}\ 400\ \text{Hz}$ 。由于在调谐过程中需要驱动高频收发机中的互锁电路,需使用  $28\ \text{V}$  直流电源,因此,天线调谐设备的电源电路需包含变压器和整流滤波电路。

天线调谐设备各组件连接关系如图 3 所示。



图 3 天线调谐设备组成

### 3 匹配网络设计

#### 3.1 研究进展

匹配分为集总参数匹配和分布式参数匹配,集总参数匹配可分为L型匹配、T型匹配和Pi型匹配等,分布式匹配可分为单枝节匹配电路和双枝节匹配电路。

自动阻抗匹配理论在上世纪七八十年代就已被提出,其实现方式之一是在天线前增加一个无源可调LC阻抗匹配网络<sup>[4]</sup>。目前较为常用的网络结构包括L型网络、T型网络<sup>[5]</sup>和Pi型网络<sup>[6]</sup>。L型网络由两种不同性质的电抗元件组成,是一种窄带网络,T型网络和Pi型网络则是为提高网络的品质因数发展而来,二者由三个电抗元件组成。

后面随着应用技术发展,研究多注重阻抗匹配设计算法等,如梯度下降法搜索<sup>[7]</sup>、梯度信息与反射系数模和相位结合法<sup>[8]</sup>、模拟退火算法<sup>[9]</sup>和标准遗传算法<sup>[10]</sup>等。

#### 3.2 匹配网络原理

在频率较高时,电路中将存在分布式电容和分布式电感,此时电路不再是纯电阻状态而变成复数形式。如图4所示, $Z_s$ 为源阻抗, $Z_L$ 为负载阻抗, $Z_1$ 为匹配网络的输入阻抗, $Z_2$ 为匹配网络的输出阻抗。 $Z_s$ 数值表示如式(2)所示,单位为 $\Omega$ , $R_s$ 为电路中的输入电阻, $j$ 为虚数单位, $X_s$ 为电路中的电抗。

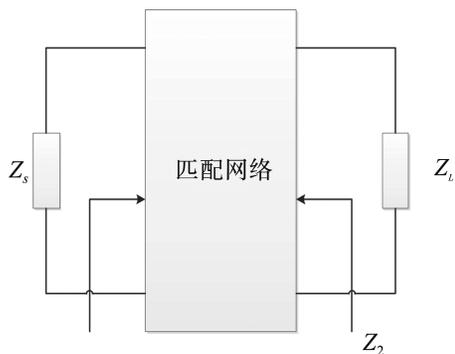


图4 阻抗匹配原理图

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (2)$$

匹配的目的是要使输出电抗与负载电抗相抵消(对于 $Z_s$ , $Z_1$ 为“负载阻抗”,对于 $Z_L$ , $Z_2$ 为“输入阻抗”)。如式(3)和式(4)所示,实现共扼匹配:

$$Z_1 = Z_s^* \quad (3)$$

$$Z_2 = Z_L^* \quad (4)$$

#### 3.3 设计思路

阻抗匹配设计要遵循如下原则:为了使阻抗匹配网络的功率增益最大,应尽量减少天线调谐设备的插入损耗,为了达到这一目标,匹配网络中的并联元件的电纳和串联元件的电抗应当尽可能减小,这样会导致匹配网络的级数增加,设计成本也相应提高,因此需要在阻抗匹配的效率和设计成本之间找到折衷,这也是设计的一个难点。

其次,为了减小匹配网络的阻抗匹配波动对信号传输功率的影响,我们应当设计阻抗匹配网络以具有较大的带宽,这样它在频段范围内就能展现出相对平坦的通带特性,从而实现相对平稳的信号功率传输。

匹配网络设计大致遵循如下步骤:

1) 确定信号源内阻和负载电阻以及寄生电容及电感数值;确定工作频率。

2) 确定要采用的匹配网络类型,如L型或T型或Pi型。

3) 确定设计方法,如使用Pi型网络的话,考虑将电感设计为由几个器件来实现;使用L网络的话如何将寄生电容或电感归并到L网络等。

4) 计算Q值。Q为有载品质因数,L网络的Q值受源内阻和负载电阻影响且不可选择,Pi型和T型可选择。

5) 计算中间电阻并与源内阻和负载电阻对比判断设计方案是否可行。

6) 计算步骤3)中所使用的电容和电感器件的具体数值。

7) 形成阻抗匹配网络。

## 4 用Smith圆图开展设计

#### 4.1 Smith圆图基础

Smith圆图是一种基于图形的解法,其特有的传输线现象可视化功能广泛应用于L型、Pi型和T型的网络匹配。Smith圆图特别适用于比较复杂的阻抗匹配网络设计,在初始设计阶段可以指导调试数据的修改。

使用Smith圆图应尽可能匹配到圆图的“中心”。

#### 4.2 匹配网络设计

仿真得到某款高频天线的典型频率的阻抗数

据如表 1 所示。

表 1 某天线特定频率的阻抗

频率/MHz	电阻/ $\Omega$	电抗/ $\Omega$
2.000	0.056 08	16.081 49
2.500	0.154 89	20.136 61
3.000	0.258 35	24.376 23
3.500	0.278 35	28.571 89
4.000	0.335 91	32.884 17
10.000	5.015 97	99.982 91
16.000	22.059 91	252.019 7
20.000	315.669 7	851.886 2
21.000	1 351.947 3	1 156.899 6
21.500	2 112.792 3	203.674 5
22.000	1 621.561 3	-782.899 3
24.000	246.181 5	-529.933 2
28.000	64.238 9	-241.223 3
28.5	60.577 3	-218.169 8
29.000	57.231 5	-206.773 5
29.500	55.348 3	-196.112 8
30.000	44.516 8	-179.772 1

将阻抗数据用 Smith 圆图打开,则如图 5 所示。使用图 5 在执行匹配工作时将更加直观。

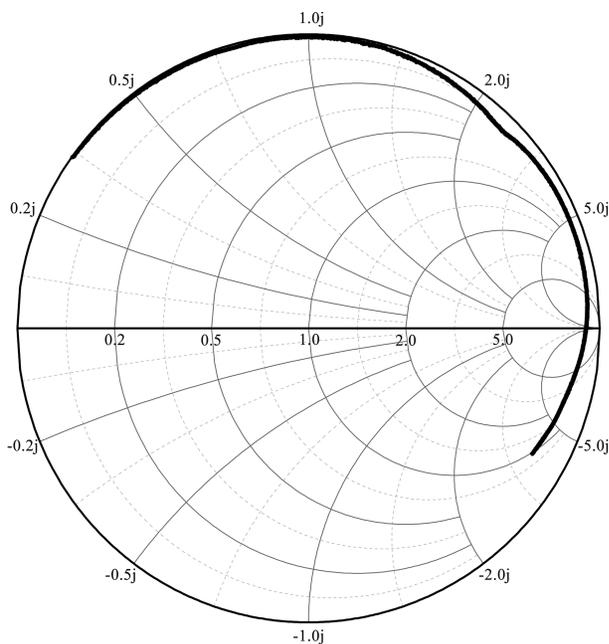


图 5 某天线的阻抗圆图

使用先进设计系统(advanced design system,简称 ADS)电路设计软件进行仿真,对高频通信系统天线与天线调谐设备间的阻抗进行匹配。

以 16.000 MHz 为例,设匹配目标阻抗为  $50 \Omega$ ,该频率的归一化阻抗为:

$$Z=0.4412+j^*5.0404 \Omega \quad (5)$$

在 ADS 软件中设置好 S1P 控件并导入天线阻抗数据,此步骤相当于 3.3 节中的步骤 1),并设置好 S 参数控件,确定大致的网络类型并插入电容及电感元器件,匹配过程可以选择串联电感、串联电容、并联电感、并联电容、串联电阻和并联电阻 6 种方式,选择不同的方式阻抗变化图将沿着不同的圆移动,调节过程中会看到 S 参数的变化。

#### 4.3 匹配网络基本电路

图 6 为一款 T 型高频通信系统阻抗匹配网络的部分电路图。由图 6 可知,自动阻抗匹配网络主要由电感、电容元件和继电器按照一定规律排列组成。

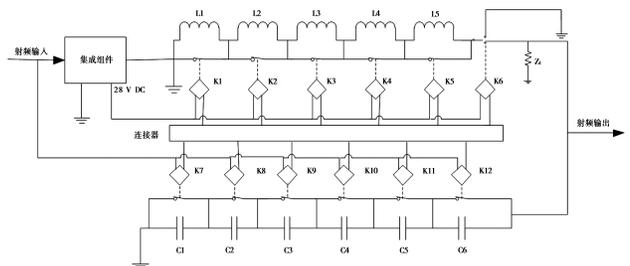


图 6 阻抗匹配网络电路

天线调谐设备每层电路均由不同数值的电容、电感、电阻、继电器和二极管组成。

电容及电感是为了抵消掉电路中的电抗特性,继电器则是为了控制元器件的通断以实现天线调谐设备的快速调谐功能,二极管则与图 2 流程中耦合器接收到新的频率有关。

通过仿真,该形式的网络可以实现表 1 天线阻抗下驻波比  $VSWR \leq 2.0$  的效果。为天线调谐设备的研制提供了思路。

实际研制中,整个天线调谐设备大约需要 300 个电容、150 个电感。

初步设计阶段可得  $C1$  为 7 pF,  $C2$  为 14 pF,  $C3$  为 28 pF,  $C4$  为 60 pF,  $C5$  为 120 pF,  $C6$  为 240 pF;  $L1$  为 15 nH,  $L2$  为 28 nH,  $L3$  为 55 nH,  $L4$  为 109 nH,  $L5$  为 212 nH,  $L6$  为 420 nH。当然,在设计迭代过程中,为了提高电路板的可靠性,或为了减小电路板尺寸或者厚度,上述元器件的值都会有轻微的改动。

## 5 结论

在民用飞机通信系统中,高频通信系统是工作频率最低的通信子系统,因其工作频率原因导致比其它子系统增加一个天线调谐器的设备。该设备用来实现天线端和收发机端的阻抗匹配,以期提高信源到天线端的最大传输功率,减小整个系统信号失真。

1) 为提高高频通信系统在 ETOPS 飞行中的可靠性,一般安装两套高频通信系统,因此两套天线调谐器之间具备互锁逻辑关系,可以使用一颗二极管实现该功能。

2) 考虑到天线调谐设备的物理连接关系和功能要求,天线调谐设备应由机箱组装件、射频阻抗匹配网络、阻抗测量传感器电路、控制电路、电源电路五部分组成。天线调谐设备使用 115 V 电源,由收发机对其供电。在调谐过程中,需要驱动高频收发机中的互锁电路,需使用 28 V 直流电源,因此,天线调谐设备的电源电路需包含变压器和整流滤波电路。

3) 利用 ADS 仿真软件设计了一款 T 型高频通信系统阻抗匹配网络,该网络由不同数值的电容和电感元件组成,并通过开关控制元器件的通断。通过仿真,该网络可以实现表 1 所列天线阻抗下驻波比  $VSWR \leq 2.0$  的效果。

4) 在实际应用中,阻抗匹配网络将由成千上百个元器件组成,考虑到电路的可靠性和其他物理特性,元器件数值将随研究进展发生改变。

### 参考文献:

[1] 李高飞. 短波天线的小型化研究[D]. 哈尔滨:哈尔

滨工业大学,2010.

- [2] 秋增国. 短波发射机阻抗匹配及因阻抗匹配引起的典型故障[J]. 广播电视信息,2018,315(7):66-67.
- [3] ARINC. HF datalink system:ARINC 753 [S]. U.S.: ARINC,2001.
- [4] 艾慧,谭阳红,何怡刚,等. 自动调谐系统阻抗匹配网络解析法[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(2):283-290.
- [5] SUN Y, FIDLER J K. Practical considerations of impedance matching network design [C]//International Conference on HF Radio Systems and Techniques. [S.l.]: IEE Conference Publication,1994:229-233.
- [6] THOMPSON M, FIDLER J K. Determination of the impedance matching domain of impedance matching networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regulars Papers,2004,51(10):2098-2106.
- [7] PARRO V C, PAIT F M. Design of an automatic impedance matching system for industrial continuous microwave ovens: part I: modeling and off line tuning [C]//Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference-IMOC 2003. [S.l.]:IEEE,2003:791-795.
- [8] 刘汉斐,程健,钱玉良. 一种自动阻抗匹配算法[J]. 计算机工程,2009,35(9):275-276,279.
- [9] 钱玉良,程健,刘东宇. 模拟退火算法在自动阻抗匹配器中的应用研究[J]. 测控技术,2009,28(9):80-83.
- [10] 解光军,顾云海,夏禹根. 用于 RFID 的自动天线调谐系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报,2009,23(3):49-53.

### 作者简介

赵健女,硕士,工程师。主要研究方向:高频通信系统集成。E-mail: zhaojian6471@163.com

## Research on impedance matching technology of HF communication system of civil aircraft

ZHAO Jian \*

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** The high frequency communication, also known as shortwave communication system, works in the frequency band of 2.000 0 to 29.999 9 MHz. In the design of software such as communication mode and data processing, HF communication system is at the forefront of scientific and technological development like other communication subsystems. However, there are few studies on hardware design, especially antenna design and impedance matching, especially on shortwave communication technology applied to civil aircraft. However, in order to achieve the maximum power transmission to the load and to improve the noise figure, it is important to change the impedance. Therefore, this paper first introduces the equipment composition of the HF communication system, then focuses on the impedance matching process of the system and the internal circuit composition of the antenna tuner, and then focuses on the working principle and design ideas of impedance matching, aiming to provide a reference for the index improvement of the HF communication system.

**Keywords:** high frequency communication; impedance matching; Smith circle chart; antenna tuner

---

\* Corresponding author. E-mail: zhaojian6471@163.com