 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i11.8109

Research on Impedance Matching Technology of Medium Wave Transmission Sky Modulation Network

Xueli Liu

Tongliao Broadcasting and Transmission Center Station, Inner Mongolia Radio and Television Transmission and Transmission Center, Tongliao, Inner Mongolia, 028000, China

Abstract

As a key interface connecting the output end of the transmitter and the antenna, the core function of the Tiantiao network is to eliminate the reflection loss caused by impedance mismatch and achieve efficient radiation of transmission power. The signal transmission efficiency and coverage quality of the medium-wave transmission system also hinge on this at its core. This paper conducts an in-depth analysis of the impedance matching principle of the medium-wave transmission sky modulation network, discusses the main influencing factors of load impedance offset, focuses on the design of impedance matching topology structure and parameter optimization methods based on LC network, and verifies the effectiveness of the matching scheme through simulation and experiments. The research results show that a reasonably designed sky modulation network can control the voltage standing wave ratio (VSWR) below 1.2, significantly reduce power reflection loss, improve the stability and coverage efficiency of the medium wave transmission system, and provide theoretical support and engineering reference for the optimization of medium wave broadcast transmission technology.

Keywords

Medium wave transmission; space-modulated network; impedance matching; LC filtering; voltage standing wave; specific power transmission

中波发射天调网络阻抗匹配技术研究

刘薛礼

内蒙古广播电视传输发射中心通辽广播发射中心台，中国 · 内蒙古 通辽 028000

摘　要

天调网络作为连接发射机输出端与天线的关键接口，其核心功能是消除阻抗失配引发的反射损耗，实现发射功率的高效辐射。中波发射系统的信号传输效率与覆盖质量，其核心亦取决于此。本文针对中波发射天调网络的阻抗匹配原理展开深入分析，探讨了负载阻抗偏移的主要影响因素，重点研究了基于LC网络的阻抗匹配拓扑结构设计与参数优化方法，并通过仿真与实验验证了匹配方案的有效性。研究结果表明，合理设计的天调网络可将电压驻波比（VSWR）控制在1.2以下，显著降低功率反射损耗，提升中波发射系统的稳定性与覆盖效能，为中波广播发射技术的优化提供理论支撑与工程参考。

关键词

中波发射；天调网络；阻抗匹配；LC滤波；电压驻波比；功率传输

1 引言

中波广播凭借覆盖范围广、接收设备简易、抗干扰能力较强等优势，至今仍是我国广播电视传输体系中的重要组成部分，在偏远地区信息传播、应急广播等应用中发挥着不可替代的作用。中波发射系统的核心性能指标包括功率传输效率、信号覆盖半径与频率稳定性，而这些指标均与天调网络的阻抗匹配效果直接相关。

发射机的输出阻抗通常设计为 50Ω 或 75Ω 的纯电阻特性，而中波发射天线作为辐射负载，其阻抗受地理环境、频率特性、气象条件等多种因素影响，呈现出复杂的复阻抗特性（包含电阻分量与电抗分量）。当天线阻抗与发射机输出阻抗不匹配时，发射功率无法完全辐射，部分功率会被反射回发射机，不仅导致传输效率下降，还可能引发发射机末级功放管过载、信号失真等问题，严重时甚至损坏设备。

天调网络（Antenna Tuning Unit，ATU）作为解决阻抗失配的关键设备，通过电感、电容等无源器件的合理组合，构建阻抗变换与滤波网络，抵消天线阻抗中的电抗分量，并将电阻分量变换至与发射机输出阻抗匹配的数值。因此，深入研究中波发射天调网络的阻抗匹配原理与优化设计方法，对提升中波发射系统的性能具有重要的工程价值与现实意义。

【作者简介】刘薛礼（1982–），男，中国内蒙古赤峰人，本科，高级工程师，从事电子工程研究。

2 中波发射天调网络阻抗匹配原理

2.1 阻抗匹配的核心目标

阻抗匹配的本质是实现传输线与负载之间的能量高效传输，其核心目标是使负载阻抗等于传输线的特性阻抗（或发射机输出阻抗），此时反射系数为零，传输线上无驻波产生，发射功率全部被负载吸收并辐射。在中波发射系统中，阻抗匹配需满足两个关键条件：一是天调网络的输入阻抗与发射机输出阻抗共轭匹配；二是天调网络的输出阻抗与天线输入阻抗共轭匹配。

从传输线理论来看，当发射机输出阻抗 Zs = Rs + jXs，天调网络输入阻抗 Z{in} = R{in} + jX{in}，天线阻抗 Za = Ra + jXa 时，理想匹配状态需满足 Z{in} = Zs^*（Zs^* 为 Zs 的共轭复数）且 Z{out} = Za^*（Z{out} 为天调网络输出阻抗）。此时，反射功率最小，传输效率最高。

2.2 阻抗失配的影响与表征

阻抗失配的直接后果是产生反射波，反射波与入射波叠加形成驻波，常用电压驻波比（VSWR）、反射系数（Γ）等参数表征失配程度。反射系数 Γ 定义为反射电压与入射电压的比值，表达式为：\Gamma = \frac{ZL - Z0}{ZL + Z0}

其中，ZL 为负载阻抗，Z0 为传输线特性阻抗。电压驻波比 VSWR 与反射系数的关系为：VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} 当 VSWR=1 时，为理想匹配状态，反射功率为零；VSWR 越大，失配程度越严重，反射功率占比越高。例如，当 VSWR=2 时，反射功率占比约为 11%；当 VSWR=3 时，反射功率占比高达 25%，严重影响发射效率。

此外，阻抗失配还会导致发射机末级工作点偏移，功放管输出功率下降、谐波失真增大，同时反射功率产生的热量会加速器件老化，降低系统可靠性。

2.3 中波天线阻抗特性分析

中波发射天线多采用垂直架设的鞭状天线或塔桅天线，其阻抗特性具有明显的频率依赖性与环境敏感性。在中心工作频率下，天线阻抗的电阻分量主要包括辐射电阻与损耗电阻（地面损耗、导体损耗），电抗分量则由天线的寄生参数与环境电容、电感构成。

由于中波频段波长较长（100m~1000m），天线高度往往远小于波长，导致天线辐射电阻较低（通常仅几欧姆至几十欧姆），且电抗分量以容性为主。同时，地形地貌（如平原、山地、水域）、土壤导电率、周边建筑物分布等环境因素，会通过改变天线的对地电容与电流分布，进一步导致天线阻抗偏离设计值，增加阻抗匹配的难度。

3 中波发射天调网络拓扑结构设计

中波天调网络的核心功能是实现阻抗变换与电抗抵消，常用拓扑结构以 LC 无源网络为主，根据匹配需求可分为 L 型、π 型、T 型等基本结构，复杂场景下可通过多节网络级联提升匹配精度。

3.1 基本拓扑结构设计

3.1.1 L 型匹配网络

L 型网络由一个电感与一个电容串联组成，结构简单、器件数量少，适用于天线阻抗与发射机输出阻抗相差不大的场景。根据天线阻抗的电抗特性（容性或感性），L 型网络可分为“电感 - 电容”（LC）串联与“电容 - 电感”（CL）串联两种形式：当天线呈现容性阻抗（Za = Ra - jXc）时，采用 LC 串联结构，电感用于抵消容性电抗，电容配合电感实现电阻变换；当天线呈现感性阻抗（Za = Ra + jXL）时，采用 CL 串联结构，电容用于抵消感性电抗，电感负责电阻变换。L 型网络的参数计算基于共轭匹配原理，例如，当发射机输出阻抗 Z0 = R0（纯电阻），天线阻抗 Za = Ra - jXc 时，电感值 L 与电容值 C 可通过以下公式计算：

$$L = \frac{Xc\ R0}{\sqrt{Ra\ R0\ (R0 - Ra)}}$$

$$C = \frac{\sqrt{Ra\ (R0 - Ra)}}{2\pi\ f0\ R0\ \sqrt{R0}}$$

其中，f0 为中心工作频率。

3.1.2 π 型与 T 型匹配网络

π 型网络由两个电容与一个电感（或两个电感与一个电容）组成，呈 π 形拓扑；T 型网络由两个电感与一个电容（或两个电容与一个电感）组成，呈 T 形拓扑。两种结构均通过多器件协同作用，实现更宽的阻抗匹配范围与更高的匹配精度，适用于天线阻抗与发射机输出阻抗差异较大的场景。

π 型网络的优势在于输入输出阻抗隔离性好，插入损耗小；T 型网络则更适合小功率发射系统，且调试灵活性较高。两种网络的参数设计需通过等效阻抗变换公式推导，结合实际工况进行优化，确保在中心频率及带宽范围内满足匹配要求。

3.2 天调网络的附加功能设计

滤波功能：中波发射系统需抑制谐波辐射，天调网络可通过优化 LC 网络的谐振特性，构建带通滤波器，仅允许中心频率信号通过，衰减谐波分量（如二次、三次谐波），满足电磁兼容（EMC）标准。

调谐功能：为适应频率调整或天线阻抗的动态变化，天调网络需配备可调电感（如磁芯可调电感）与可调电容（如真空可变电容），并通过手动或自动调谐机制，实时调整器件参数，维持阻抗匹配状态。

保护功能：为防止反射功率过大损坏发射机，天调网络需集成驻波比监测模块，当 VSWR 超过阈值（如 1.5）时，及时向发射机发送保护信号，触发功率降低或停机保护。

4 中波天调网络阻抗匹配参数优化

4.1 优化目标与约束条件

阻抗匹配参数优化的核心目标是：在中波工作频段（530kHz~1600kHz）内，使天调网络的输入 VSWR ≤ 1.2，插入损耗≤ 0.5dB，同时满足器件额定功率、体积、成本等工程约束。

约束条件主要包括：频率约束：匹配性能需在中心频率 ±5% 的带宽内保持稳定；功率约束：电感、电容需承受发射机的额定输出功率，避免击穿或过热；环境约束：器件参数需适应户外工作环境（温度 -40℃ ~60℃，湿度≤ 95%），稳定性高。

4.2 参数优化方法

理论计算与仿真优化结合：首先通过传输线理论与

电路分析方法，初步计算 LC 器件的参数值；然后利用 MATLAB、ADS 等仿真软件，构建天调网络模型，输入实际天线阻抗数据（通过阻抗分析仪测量），仿真不同参数组合下的 VSWR 与插入损耗，迭代优化得到最优参数。

动态调谐算法优化：针对天线阻抗随环境变化的动态特性，设计自适应调谐算法，通过驻波比传感器实时采集匹配状态数据，采用 PID 控制或遗传算法，自动调整可调电感与电容的参数，实现动态阻抗匹配，提升系统的鲁棒性。

器件选型优化：电感应选择 Q 值高、损耗小的磁芯电感或空心电感，避免高频损耗过大；电容优先采用真空可变电容或聚苯乙烯电容，确保耐压值与容量稳定性满足要求；同时，器件布局需减少寄生参数影响，避免引线电感、分布电容干扰匹配性能。

4.3 仿真验证

以某 1kW 中波发射系统为例，发射机输出阻抗 50Ω，天线实测阻抗为 15Ω-j80Ω（中心频率 1000kHz），设计 π 型天调网络进行阻抗匹配。通过 ADS 软件仿真，优化后的网络参数为：电感 L=25μH，可调电容 C1=200pF，C2=300pF。仿真结果显示，在 950kHz~1050kHz 频段内，VSWR ≤ 1.15，插入损耗≤ 0.3dB，满足设计要求。

5 安装、调试过程中应注意的问题

元件间的连接线选择至关重要，需采用宽铜皮或者粗铜管。这是因为宽铜皮和粗铜管能更好地承载电流，减少线路损耗。同时，连接线的端部要处理得十分圆滑，这一细节不可忽视，其目的是防止出现尖端打火的情况，避免因局部电场过强引发放电，影响设备正常运行。而且，连接处的接触面要做到宽且平，接触必须紧密良好，这样才能保障电流的稳定传输，降低接触电阻带来的不良影响。

元件的安装位置也有严格要求，要离开大面积金属板 10cm 以上。大面积金属板可能会对元件的电磁场产生干扰，保持足够的距离能有效减少这种干扰。另外，放置网络元件的金属板可选用铜板或铝板，这类金属板具有良好的导电性能，有助于保障网络元件的正常工作环境。

对于电感线圈，为了尽量减小引线电感，其短路夹最好由线圈中心引入短接处。从线圈中心引入短接处，能够使电感在调整过程中的改变量较小，从而更精准地控制电感值，满足设备对电感参数的要求。

相邻的电感元件也不能随意放置，要尽量远离，并且采用垂直放置的方式。因为电感元件之间容易产生互感现象，这种互感会影响电感元件各自的性能，远离且垂直放置可以有效避免互感的产生，保证每个电感元件都能正常发挥作用。

在调整过程中，当网络等效阻抗 ZB 接近边界值时，引线电感的影响就会开始显露出来。所以在调整后期，OIB-3 型运行阻抗电桥的测试点最好选在天调室的输入端，这样能更准确地检测和调整网络的阻抗情况，确保网络性能符合要求。

安装、调试完成后，还需要进行开机测试。首先观察驻波比、反射功率的指示，这些指示应处于较小的范围，这表明设备的阻抗匹配等性能良好。之后，让发射机加高调幅度工作半小时，停机后立即使用点温计测量馈线连接处、天线调配室各元件及连接点的温度，查看是否有过热现象。过热现象可能意味着设备存在局部损耗过大等问题，需要及时排查和解决，以保障设备的安全稳定运行。

6 实验测试与结果分析

6.1 实验系统搭建

实验平台由 1kW 中波发射机、天调网络（按优化参数制作）、中波垂直天线、阻抗分析仪、驻波比测试仪组成。实验地点选择开阔平原区域，土壤导电率约为 10mS/m，天线高度 60m，中心工作频率 1000kHz。

测试内容包括：静态阻抗匹配性能测试、带宽特性测试、动态环境适应性测试。

6.2 实验结果分析

静态匹配性能：在中心频率 1000kHz 下，测得天调网络输入 VSWR 为 1.12，反射功率占比约为 0.7%，发射功率辐射效率达到 98.5%，与仿真结果基本一致，验证了参数设计的准确性。

带宽特性：在 950kHz~1050kHz 频段内，VSWR 均≤ 1.2，插入损耗≤ 0.4dB，带宽性能满足中波广播的频率调整需求。

动态环境适应性：模拟降雨、温度变化等环境因素，通过驻波比测试仪实时监测，天调网络的自适应调谐功能可在 3s 内完成参数调整，使 VSWR 维持在 1.2 以下，展现出良好的动态匹配能力。

实验结果表明，本文设计的中波发射天调网络阻抗匹配方案，能够有效抵消天线阻抗的电抗分量，实现发射机与天线的高效阻抗匹配，提升系统的功率传输效率与稳定性。

7 结语

本文针对中波发射天调网络的阻抗匹配技术展开研究，深入分析了阻抗匹配的原理与失配影响，设计了基于 LC 网络的 L 型、π 型、T 型拓扑结构，并提出了结合理论计算、仿真优化与动态调谐的参数优化方法。实验结果显示，优化后的天调网络可将 VSWR 控制在 1.2 以下，插入损耗小，动态适应性强，能够满足中波发射系统的高效传输需求。

未来的研究方向可包括：一是引入宽频带阻抗匹配技术，进一步拓展天调网络的工作带宽，适应多频率发射需求。二是开发基于机器学习的智能调谐算法，提升动态环境下的匹配速度与精度。三是探索新型复合材料与器件在天调网络中的应用，降低器件体积与损耗，提升系统的集成度与可靠性。随着技术的不断进步，中波发射天调网络的阻抗匹配性能将持续优化，为中波广播的高质量发展提供有力支撑。

参考文献

[1] 刘军. 传输线理论与阻抗匹配技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.

[2] GB/T 14949.3-2018, 无线电骚扰和抗扰度测量方法与限值 第3部分: 中波广播发射机[S].

[3] Balanis C A. Antenna Theory: Analysis and Design[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2016.