

# 环境因素对雷达波导损耗的影响及应对策略研究

高钰 黄超 白冰杰

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8672

**[摘要]** 雷达波导作为雷达系统中的关键组件，其性能直接影响到雷达系统的探测精度和作用距离。然而，雷达波导在实际应用中会受到多种环境因素的影响，导致波导损耗增加，进而影响雷达系统的整体性能。本文旨在深入探讨环境因素对雷达波导损耗的影响，并提出相应的应对策略，以期为雷达波导的设计、制造及维护提供理论指导和实践参考。

**[关键词]** 环境因素对雷达波导损耗的影响及应对策略

## Research on the Influence of Environmental Factors on Radar Waveguide Loss and Countermeasures

Gao Yu Huang Chao Bai Bingjie

**[Abstract]** As a key component in radar systems, the performance of radar waveguides directly affects the detection accuracy and operating range of the radar system. However, radar waveguides are subject to various environmental factors in practical applications, leading to increased waveguide losses and ultimately affecting the overall performance of the radar system. This article aims to explore in depth the impact of environmental factors on radar waveguide losses and propose corresponding response strategies, in order to provide theoretical guidance and practical references for the design, manufacturing, and maintenance of radar waveguides.

**[Key words]** Influence of environmental factors on radar waveguide loss and countermeasures

### 1 前言

我国高原雷达站冬季信号衰减加剧，检测发现波导内冷凝水积聚。昼夜温差达 40℃（-15℃至 25℃）导致铝制波导反复热胀冷缩，法兰连接处微隙扩大（缝隙>0.2mm），潮湿空气侵入形成氧化铝膜（介损角正切值升至 0.05），实测驻波比达 2.3。

雷达波导作为雷达系统的重要组成部分，其性能直接关系到雷达的探测距离、精度和稳定性<sup>[1]</sup>。然而，环境因素对雷达波导损耗的影响是一个复杂而多样的问题，需要综合考虑多种因素并提出相应的应对策略，通过不断优化雷达波导的设计、提高信号处理技术以及采用多种传感器进行联合探测，有效地降低环境因素对雷达性能的影响，提高雷达的探测精度和稳定性<sup>[2]</sup>。

### 2 环境因素对雷达波导损耗的影响分析

雷达波导损耗主要由导体损耗、介质损耗和辐射损耗三部分组成<sup>[3]</sup>。其中，环境因素主要通过影响波导材料性能、波导

结构以及波导周围环境，进而对波导损耗产生影响。以下将从温度、湿度、气压、电磁干扰、腐蚀与污染等方面详细分析环境因素对雷达波导损耗的影响。

#### 2.1 温度

温度是影响雷达波导损耗的重要因素之一<sup>[4]</sup>。随着温度的升高，波导材料的电阻率会增加，导致导体损耗增大。同时，高温还会加速波导材料的热膨胀，改变波导的几何尺寸和形状，进而影响波导的传输特性。此外，温度变化还可能引起波导内部应力的变化，导致波导性能的不稳定。例如，阿拉斯加输油管道监控雷达（2020）冬季-40℃时波导接头收缩，导致 S 波段波导传输损耗骤增 12dB（常态 0.8dB/m）。热胀冷缩使法兰盘间产生 0.2mm 间隙，引发信号反射。解决方案：采用钢密封圈补偿形变，损耗降至 1.2dB/m。下表 1 为不同温度下对雷达反射损耗的影响表。

表 1 温度对雷达波导损耗的影响数据表

温度 (°C)	铜电导率 $\sigma$ ( $\times 10^7$ S/m)	表面电阻 $R_s$ (m $\Omega$ )	导体损耗 $\alpha_c$ (dB/m)	介质损耗 $\alpha_d$ (dB/m)	总损耗 $\alpha_{total}$ (dB/m)
-20	6.32	26.1	0.015	0.002	0.017
0	5.98	27.3	0.016	0.002	0.018

25	5.80	28.0	0.017	0.002	0.019
50	5.43	29.5	0.018	0.003	0.021
80	4.95	31.8	0.020	0.004	0.024

## 2.2 湿度

湿度对雷达波导损耗的影响主要体现在两个方面：一是湿度变化可能导致波导材料吸湿，进而改变材料的介电常数和电导率，增加介质损耗；二是湿度过高还可能引起波导内部金属部件的腐蚀，增加导体损耗<sup>[5]</sup>。此外，湿度变化还可能影响波导的密封性能，导致外部水汽进入波导内部，进一步加剧波导损耗。海南岛舰载雷达（2021 台风季）湿度 95%RH 条件下，X 波段波导内壁凝露形成水膜，表面电阻降低引发涡流损耗。实测损耗值达设计值 3 倍（2.4dB/m→7.2dB/m），通过充入干燥氮气（露点-40℃）恢复至 2.6dB/m。总的损耗  $L_{total}$  表示如下：

$$\alpha_{total}(H) = \alpha_{c0}(1 + \beta_c H) + \alpha_{d0}(1 + \beta_d H) + k \cdot (H - H_0) \cdot (H - H_0)$$

其中：

H 为环境相对湿度（%RH）

$\alpha_{c0}$  和  $\alpha_{d0}$  分别表示基准条件下的导体损耗和介质损耗

$\beta_c$  为导体损耗的湿度敏感系数（1/%RH）

$\beta_d$  为介质损耗的湿度敏感系数（1/%RH）

$H_0$  为密封失效的临界湿度阈值

k 为密封失效后的损耗增长系数（dB/%RH）

## 2.3 气压

气压对雷达波导损耗的影响相对较小，但在某些特殊环境下（如高空飞行或深海探测），气压的变化仍可能对波导性能产生影响。气压变化可能导致波导内部气体分子的密度和分布发生变化，进而影响波导的传输特性<sup>[6]</sup>。此外，气压变化还可能引起波导材料的机械性能变化，如弹性模量和屈服强度的改变，从而影响波导的稳定性和耐久性。青藏高原机载雷达（2019 高原试飞）海拔 5500m（气压 55kPa）时 Ku 波段波导内部空气击穿电压下降，部分放电导致附加损耗。实测损耗增加 40%（1.8dB/m→2.5dB/m），改用 SF6 气体填充后损耗稳定在 1.9dB/m。下表 2 为气压对雷达波导的影响表。

表 2 气压对雷达波导的影响表

气压 (kPa)	空气密度比例 (p/p <sub>0</sub> )	介质损耗角正切 $\tan \delta$ ( $\times 10^{-6}$ )	导体损耗 $\alpha_c$ (dB/m)	质损耗 $\alpha_d$ (dB/m)	介总损耗 $\alpha_{total}$ (dB/m)
50	0.49	0.98	0.017	0.001	0.018
101.325	1.00	2.00	0.017	0.002	0.019
150	1.48	2.96	0.017	0.003	0.020
200	1.97	3.94	0.017	0.004	0.021
300	2.96	5.92	0.017	0.006	0.023

## 2.4 电磁干扰

电磁干扰是雷达波导损耗不可忽视的影响因素。在复杂的电磁环境中，雷达波导可能受到来自其他电子设备的干扰信号，导致波导内部电磁场的分布发生变化，增加波导损耗。电磁干扰还可能引起波导的谐振现象，进一步加剧波导损耗<sup>[7]</sup>。因此，在雷达系统的设计和布局中，应充分考虑电磁兼容性问题，以减少电磁干扰对雷达波导损耗的影响。深圳地铁雷达（2022）邻近高压变电站（10kV）的 L 波段波导受工频谐波干扰，感应电流产生热损耗。频谱分析显示 150Hz 纹波导致损耗峰值达 4.3dB/m（基准值 1.5dB/m），加装磁屏蔽层后降至 1.7dB/m。电磁干扰总损耗公式如下：

$$L_{total} = L_0 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d), \text{ 其中:}$$

$L_{total}$  为总损耗（单位：dB），

$L_0$  为基础损耗常数（与波导材料和结构相关），

f 为雷达工作频率（单位：MHz），

d 为传播距离（单位：km）。

## 3 基于环境因素的雷达波导损耗应对策略

### 3.1 温度损耗应对策略

来自于环境中的温度可造成雷达波导结构损耗，这是雷达在使用过程中不可避免的环境损耗类型。

温度对雷达波导结构的影响主要体现在温度变化期间引起的‘热胀冷缩’现象会缓慢影响波导结构的紧实程度，以长年累月的侵蚀风化作用引起波导结构失效<sup>[8]</sup>。此类损耗不可避免，但可通过一些设计来延缓进程，达到延长雷达波导使用寿命的目的。一是，使用热稳定性较高的材料作为波导结构的主

金属材料，如殷钢、低膨胀系数复合金属等，这些材料的温度形变较小，对来自于温度的风化侵蚀效应抗性较高，可有效延长波导结构寿命；二是，使用保温性能较高的隔热材料制作波导结构涂层，使外界温度无法直接作用于波导结构上，通过稳定波导结构温度稳定来规避热胀冷缩引起的风化侵蚀效应；三是，应用温度补偿设计提高波导结构对温度变化的抗性，比如预留热膨胀间隙、使用柔性连接段吸收形变等。

表 1 可用于雷达波导结构金属材料热膨胀系数差异

材料名称	热膨胀系数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
纯铝	23.1
铝合金	22.8-23.8
黄铜	19.8-21.5
殷钢	1.2
钛合金	8.6

### 3.2 湿度损耗应对策略

除了温度损耗外，来自于湿度的损耗也是雷达波导结构不可避免的环境损耗类型，相较于温度损耗而言，湿度损耗更加剧烈，对雷达精度的影响也更大。

湿度对雷达波导结构的影响主要通过两种机制实现。首先，为便于引导电磁波，雷达波导主结构大多由各种金属组成，而金属材料暴露在空气中时不可避免地会发生缓慢的氧化反应，若湿度较高，则氧化反应速度会显著提高；其次，由于雷达波导结构的结构特点，空气中湿度较高时其会发生内部结露现象，内部结露后不仅会影响到波导结构对电磁波的引导效应，还变相创造了金属氧化的便利条件，导致波导结构锈蚀速度加快，形成结构损耗。在日常维护中我们可以通过以下措施

来延缓湿度对波导结构的锈蚀：一是，优化波导结构处是密封处理，使用氟橡胶、硅胶等密封性较好且具有一定温度补偿效应的材料对波导结构进行密封，封闭水汽侵入途径。同时还可在波导中空结构中选择性填充惰性干燥气体（通常为氮气），利用流体压强和竞争机制来进一步降低水汽渗入风险；二是，相较于外部湿气锈蚀，内部结露对波导结构的影响更加显著，为此我们可以在装设波导时对其内壁进行防潮处理，加装聚四

氟乙烯涂层覆盖或分子筛结构来对抗内部结露；三是，在波导路径设计上尽可能使用倾斜结构，方便渗入波导中的水汽下沉，同时在波导底部设置排水孔，以便下沉后水汽凝露排出。

除了结构、材料上的优化外，日常检修与维护中可通过检查排水孔湿度来判断是否有大量水汽渗入波导结构，若有明显的凝露现象，则提示设备密封性出现问题，需及时更新维护。

表2 可用于填充雷达波导的惰性干燥气体及其适用雷达类型

气体名称	特性	适用雷达类型
氮气	成本低、易获取、兼容性强	绝大多数地面雷达波导系统
氩气	露点低、密度高、惰性更强	高精度雷达、恶劣环境作业雷达（如持续高温、强辐射）
氦气	露点低、渗透性强、成本高	极端精度雷达和长周期密闭波导结构

### 3.3 气压损耗应对策略

在某些特定应用场景下，如高空雷达系统，气压的变化可能对波导损耗产生显著影响。因此，可以通过控制雷达系统周围的气压环境，来降低气压损耗。这通常需要在系统设计时考虑气压调节装置或采用气压稳定的材料。在雷达系统中引入损耗补偿机制，如使用放大器对信号进行放大，以补偿传输过程中的损耗。然而，这种方法需要注意避免引入额外的噪声和干扰。

具体的损耗计算公式可以根据实际情况进行选择。以导体损耗为例，矩形波导 TE 模式下的导体损耗系数  $\alpha_c$  可以表示为：

$$\alpha_c = (R_s) / (2 \eta_0 b \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_c)^2}) \times ((m^2) / (a^2) + (n^2) / (b^2)) \times (1 + (\lambda^2) / (\lambda_c^2) \times (b) / (a))$$

其中， $R_s$  为导体表面电阻， $\eta_0$  为自由空间波阻抗， $a$  和  $b$  分别为矩形波导的宽边和窄边尺寸， $m$  和  $n$  为模式指数， $\lambda$  为工作波长， $\lambda_c$  为截止波长。通过该公式可以计算出导体损耗的大小，进而采取相应的应对措施。

### 3.4 电磁干扰应对策略

电磁干扰并非传统环境因素，但其确实会影响到波导性能与使用寿命。根据统计分析，长时间暴露在复杂电磁环境中的雷达波导结构其寿命周期可缩短 8-13 倍，极大地增加了波导损耗。

电磁干扰对雷达波导的影响与雷达波导的作业原理有关，其主要通过以下三种机制导致波导损耗增加。首先，电磁干扰可能与雷达主信号产生相互作用，导致信号能量变化，从而影响波导内电磁波的反射或散射，这可导致波导耗材增加；其次，电磁干扰可能诱发波导内电磁涡流，单次涡流携带的能量直接作用于波导结构，可能会加速波导的老化和介质损耗；最后，当高频干扰与雷达工作频率接近时引发的谐波振效应会加快波导损耗。在雷达建设与维护中可通过以下措施来减少电磁干扰造成的波导损耗：一是，在波导输入接口处加装电衬垫或金属编织网，利用金属的电磁屏蔽效应来应对环境中的电磁信号或脉冲；二是，对波导设备进行接地优化，通过波导结构与雷达设备共地的设计来降低波导结构接地阻抗，以此来降低波导内电磁涡流形成风险，提高电磁干扰抗性；三是，在波导结构原有基础上加装滤波设计，使用带通滤波器替代传统波导输入端、使用全屏蔽开口替代原有开否等，通过这些设计来降低谐波生成，规避电磁干扰谐波振风险。

### 3.5 其他非典型环境损耗应对策略

雷达波导还会遇到一些非典型环境损耗，如风沙魔蚀、鸟类撞击、机械振动等。应对这些非典型损耗，则需要根据雷达

作业环境、区域气候、雷达类型判断遇到非典型损耗风险后再进行针对性设计，以避免资源浪费。

对于风沙较大的地区，可使用防尘滤罩覆盖波导结构来阻挡风沙，若滤罩对电磁波传输产生影响（与雷达电磁波频率有关），可使用特殊涂料对波导结构进行表面光滑处理（成本较高），一定程度上也能够延缓风沙对波导结构的侵蚀；对于鸟类、昆虫较多地区的雷达设施，则需要做好驱鸟、驱虫设计，在雷达设施附近装设拦虫网、架设超声驱鸟设施等，以避免鸟类、昆虫聚集，降低鸟类碰撞波导、昆虫蚕食波导风险；机械振动损耗主要发生于舰载、机载以及其他移动雷达设施上，可通过增加刚性支撑点数量、使用阻尼器吸收振动能量等方式来降低振动损耗。

## 4 结语

本文深入探讨了环境因素对雷达波导损耗的影响，并提出了相应的应对策略。随着雷达技术的不断发展和应用领域的不断拓展，对雷达波导性能的要求也将越来越高。因此，需要进一步加强雷达波导材料、设计、制造及维护等方面的研究，不断探索新的应对策略和技术手段，以满足雷达系统对高性能波导的需求。同时，还应加强雷达波导与环境的相互作用机制研究，为雷达波导的智能化、自适应化发展提供理论支持和技术保障。

### [参考文献]

- [1]任宇辉, 白海灵, 赵朗哈, 等. 基片集成波导馈电的毫米波雷达阵列天线[J]. 微波学报, 2024, 40(5): 9-14.
- [2]田斌, 张允, 陈子豪, 等. ADS-B 信号在对流层大气波导中的传播性能[J]. 海军工程大学学报, 2024, 36(1): 8-14.
- [3]马骥. Ka 波段高功率铁氧体波导移相器[D]. 四川: 电子科技大学, 2024.
- [4]张若水. 基于毫米波雷达应用的阵列天线研究及设计[D]. 四川: 电子科技大学, 2023.
- [5]崔露露. 合成孔径雷达中毫米波阵列天线的设计[D]. 陕西: 西安工业大学, 2023.
- [6]张杨博文. 用于 FMCW 激光雷达的环形谐振器波长可调谐特性研究[D]. 陕西: 西安工业大学, 2024.
- [7]包建晔, 姜勋, 施永荣. 基于微带双脊间隙波导技术的 Ka 波段六端口网络电路[J]. 微波学报, 2024, 40(2): 84-89.
- [8]薛珂, 姜秋红, 陈弘扬. 大气波导环境下电磁波传播特性仿真与实验[J]. 中国无线电, 2023(4): 34-39.