



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(专业学位)

基于分形贴片天线的无源传感器 增敏机制及小型化研究

(国家自然科学基金面上项目 No. 52378311、52078375)

姓 名：范永瑞琛

学 号：2132251

学 院：土木工程学院

学科门类：工学

专业学位类别：土木水利

专业领域：土木工程

研究方向：防灾减灾及防护工程

指导教师：谢丽宇 研究员

二〇二四年五月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Engineering

**Research on sensitization mechanism and
miniaturization of passive sensor based on
fractal patch antenna**

(National Natural Science Foundation Project No. 52378311,
52078375)

Candidate: Fan Yongruichen

Student Number: 2132251

School/Department: College of Civil Engineering

Categories: Engineering

Degree: Civil and Hydraulic Engineering

Degree's Field: Civil Engineering

Research Fields: Disaster Mitigation and Protection

Engineering

Supervisor: Researcher Xie Liyu

May 2024

基于分形贴片天线的无源传感器增敏机制及小型化研究

范永瑞琛

同济大学

摘要

随着结构健康监测领域的发展，贴片天线作为一种新兴的无源无线传感器，逐渐被广泛应用于结构健康监测中，用于测量结构的应力应变、环境温度、湿度等变量。这些监测变量往往非常微小且存在复杂耦合效应，并且许多复杂结构对于传感器的布设位置及空间存在较为苛刻的要求，因此，研究如何提升贴片天线的传感灵敏度、缩减贴片天线的尺寸具有重要的实际意义。此外，研究如何拓展贴片天线传感器的应用范围并集监测功能也与经济效益以及监测流程的简化紧密相关。一方面，为实现贴片天线的尺寸缩减与传感灵敏度提升，本文基于分形贴片天线提出了一种传感灵敏度增敏设计方法与两种天线尺寸小型化设计方法；另一方面，为了拓展这种设计方法，应用分形贴片对两种贴片天线形变传感器进行了优化设计，并对分形贴片天线的温度效应进行了探究。本文的研究内容如下：

(1) 贴片天线湿度传感器的传感灵敏度与贴片的边缘长度呈正相关。本文提出了一种理论上可以实现传感器灵敏度提升的分形贴片天线设计方案。在高频仿真模拟器（(High Frequency Structure Simulator, HFSS)）中进行了传感灵敏度测试，并依照设计方案加工天线，通过水泥凝结时间监测实验测试传感灵敏度，仿真与实验结果以及理论假设基本一致，实验结果表明，增加分形贴片天线传感器的分形阶数，会提升其传感灵敏度，其中，2阶分形贴片天线的灵敏度提升了近一倍。

(2) 贴片天线的谐振频率与有效贴片长度呈负相关。贴片天线湿度传感器表面的孔洞位置会影响传感灵敏度的变化方向但不会影响谐振频率的变化方向。本文提出了一种理论上可以实现贴片天线传感器尺寸小型化的分形贴片天线湿度增敏设计方案和一种理论上可以进一步实现分形贴片天线传感器尺寸小型化的带有中部矩形孔洞的湿度退敏设计方案。在 HFSS 中进行了谐振频率与传感灵敏度测试，并依照设计方案加工了天线，通过实验测试了初始谐振频率与传感灵敏度。仿真与实验结果均与理论预测基本一致。实验结果表明，增加分形贴片天线传感器的分形阶数，会降低其初始谐振频率；增加中部矩形孔洞的边长，分形贴片天线的谐振频率会继续下降，传感灵敏度也会以较小的幅度继续降低。

(3) 对无应力式贴片天线传感器与空气间隙式传感器进行了理论研究，并应用分形设计方法对两种传感器提出了优化设计方案。随后在 HFSS 中对两种传感器进行了仿真，仿真结果与理论假设一致。仿真结果表明，应用分形贴片后，无应力式贴片天线传感器初始谐振频率降低，传感灵敏度在工作范围内提

升近两倍；而空气间隙式贴片天线的初始谐振频率降低，传感灵敏度仅降低了约五分之一。该设计方法实现了传感器性能的优化。

（4）对分形贴片天线的温度效应进行了研究，分析了相关影响因素及其对天线谐振频率的作用效果。随后，在 HFSS 中对分形贴片天线进行了仿真，并与矩形贴片天线进行对比，仿真结果与理论假设一致。仿真结果表明，分形贴片天线的热膨胀效应相对矩形贴片天线较弱。

关键词：分形贴片天线，湿度传感器，形变传感器，无源传感器，传感灵敏度，温度效应，小型化，水泥凝结时间

ABSTRACT

As the field of structural health monitoring (SHM) continues to develop, patch antennas have emerged as a novel type of passive wireless sensor, increasingly utilized in SHM for measuring variables such as structural stress and strain, environmental temperature, and humidity. These monitoring variables are often very small and exhibit complex coupling effects. Additionally, many complex structures impose stringent requirements on sensor placement and spatial constraints. Therefore, researching methods to enhance the sensing sensitivity of patch antennas and reduce their size is of significant practical importance. Moreover, exploring ways to expand the application scope of patch antenna sensors and integrate monitoring functions is closely related to economic efficiency and the simplification of monitoring processes. To achieve size reduction and sensitivity enhancement of patch antennas, this study proposes a sensitivity enhancement design method based on fractal patch antennas and two antenna miniaturization design methods. Furthermore, to expand this design approach, the study applies fractal patch optimization to two types of patch antenna deformation sensors and investigates the temperature effects on fractal patch antennas. The research content of this paper is as follows:

(1) The sensitivity of patch antenna humidity sensors is positively correlated with the edge length of the patch. This paper proposes a fractal patch antenna design scheme that theoretically enhances sensor sensitivity. Sensitivity tests were conducted using the High Frequency Structure Simulator (HFSS), and antennas were fabricated according to the design scheme. The sensitivity was tested through cement curing time monitoring experiments. Simulation and experimental results were consistent with theoretical assumptions, showing that increasing the fractal order of the patch antenna enhances its sensitivity, with the sensitivity of the second-order fractal patch antenna nearly doubling.

(2) The resonant frequency of a patch antenna is inversely related to the effective patch length. The position of holes on the surface of the patch antenna humidity sensor affects the direction of sensitivity change but does not affect the direction of resonant frequency change. This paper proposes a moisture-sensitized fractal patch antenna design scheme that theoretically achieves patch antenna sensor miniaturization and another design scheme with a central rectangular hole for moisture-free miniaturization. Resonant frequency and sensitivity tests were conducted in HFSS, and antennas were

fabricated according to the design. Initial resonant frequency and sensitivity were experimentally tested. Simulation and experimental results were consistent with theoretical predictions, indicating that increasing the fractal order of the patch antenna lowers its initial resonant frequency, while increasing the side length of the central rectangular hole further lowers the resonant frequency and slightly reduces the sensitivity.

(3) Theoretical studies were conducted on stress-free patch antenna sensors and air-gap sensors, and optimization designs using fractal methods were proposed for both sensors. Simulations in HFSS were consistent with theoretical assumptions. Simulation results showed that applying fractal patches to stress-free patch antenna sensors reduced the initial resonant frequency and nearly doubled the sensitivity within the operating range. For air-gap patch antennas, the initial resonant frequency was reduced, and sensitivity decreased by about one-fifth. This design method achieved performance optimization of the sensors.

(4) The study investigated the temperature effects on fractal patch antennas, analyzing relevant factors and their impact on the antenna's resonant frequency. Simulations in HFSS compared fractal patch antennas with rectangular patch antennas, and results were consistent with theoretical assumptions. Simulation results indicated that the thermal expansion effect of fractal patch antennas is weaker than that of rectangular patch antennas.

Keywords: Fractal patch antenna, Humidity sensor, Deformation sensor, Passive sensor, Sensing sensitivity, Temperature effect, Miniaturization, Cement setting time

目录

目录.....	V
第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 结构健康监测中的天线传感器研究概述.....	2
1.2.1 用于监测环境变化的天线传感器.....	2
1.2.2 用于监测结构应力应变的天线传感器.....	5
1.2.3 用于材料检测与分类的天线传感器.....	7
1.3 分形天线研究概述.....	10
1.3.1 分形理论与经典分形形式.....	10
1.3.2 分形天线简介.....	17
1.3.3 分形天线基本分类简介.....	20
1.3.4 分形天线实际应用简介.....	23
1.4 天线传感器增敏方法研究概述.....	24
1.4.1 材料优化.....	24
1.4.2 天线设计改进.....	25
1.4.3 信号处理技术.....	26
1.4.4 集成和系统优化.....	26
1.5 小型化天线研究概述.....	27
1.5.1 天线小型化主要方法.....	27
1.5.2 天线小型化具体技术路径.....	28
1.5.3 天线小型化的限制与挑战.....	30
1.6 本文研究目的、意义及内容.....	31
1.6.1 研究目的及意义.....	31
1.6.2 研究技术路线.....	32
1.6.3 主要研究内容.....	33
第 2 章 贴片天线的电磁参数和基本工作原理.....	35
2.1 电磁场和天线基本理论.....	35
2.1.1 麦克斯韦方程组.....	35
2.1.2 天线收发电磁波能力.....	36
2.2 贴片天线基本原理.....	38
2.2.1 谐振腔基本理论.....	38
2.2.2 基于谐振腔假定的贴片天线谐振频率计算.....	40
2.3 贴片天线谐振频率的影响因素.....	41
2.3.1 基板相对介电常数.....	41

2.3.2 贴片天线上辐射贴片谐振方向长度.....	42
2.4 本章小结.....	43
第 3 章 分形贴片天线湿度传感器增敏机制研究.....	44
3.1 传感器设计原理.....	44
3.1.1 贴片天线湿度传感器传感原理.....	44
3.1.2 边缘长度理论与湿度灵敏度增敏机制.....	47
3.1.3 一种类闵可夫斯基 X 分形的迭代与生成方法.....	52
3.2 传感器的选型与设计方案.....	54
3.2.1 选型与设计原则.....	54
3.2.2 选型与设计方案.....	55
3.3 本章小结.....	59
第 4 章 基于水泥凝结时间监测的湿度增敏仿真与实验验证.....	60
4.1 贴片天线监测水泥凝结时间理论设计.....	60
4.1.1 水泥净浆凝结状态下水分变化.....	61
4.1.2 水泥净浆凝结状态下介电常数变化.....	62
4.2 传感器仿真分析.....	63
4.2.1 HFSS 建模.....	63
4.2.2 模拟结果.....	66
4.3 实验验证与结果讨论.....	69
4.3.1 实验设计.....	69
4.3.2 实验数据分析.....	72
4.3.3 实验结果讨论.....	76
4.4 本章小结.....	78
第 5 章 分形贴片天线湿度传感器小型化研究.....	79
5.1 湿度增敏的小型化设计方法.....	80
5.1.1 电流路径理论与小型化原理.....	80
5.1.2 传感器仿真分析.....	82
5.1.3 实验验证与结果讨论.....	86
5.2 湿度退敏的小型化设计方法.....	89
5.2.1 孔洞位置理论与解耦设计原理.....	90
5.2.2 传感器选型与设计方案.....	94
5.2.3 传感器仿真分析.....	97
5.2.4 实验验证与结果讨论.....	104
5.3 本章小结.....	112
第 6 章 分形贴片天线结构形变传感器增敏效果影响研究.....	114
6.1 无应力式分形贴片天线形变传感器.....	114
6.1.1 传感器设计原理.....	115
6.1.2 仿真分析.....	117

6.2 空气间隙式分形贴片天线形变传感器.....	122
6.2.1 传感器设计原理.....	123
6.2.2 仿真分析.....	126
6.3 本章小结.....	129
第 7 章 温度对分形贴片天线的影响探究.....	130
7.1 贴片天线谐振频率受温度影响基本原理.....	130
7.1.1 热膨胀效应.....	130
7.1.2 基板介电常数受热变化.....	132
7.1.3 矩形贴片天线在温度效应影响下的谐振频率.....	132
7.1.4 分形贴片天线在温度效应影响下的谐振频率.....	132
7.2 温度对分形贴片天线影响模拟.....	134
7.2.1 HFSS 建模.....	134
7.2.2 模拟结果.....	135
7.3 本章小结.....	137
第 8 章 结论与展望.....	139
8.1 结论.....	139
8.2 展望.....	141
参考文献.....	142
致谢.....	149
个人简历、在读期间发表的学术成果.....	151

第 1 章 绪论

1.1 引言

结构健康监测（Structural Health Monitoring，简称 SHM）的重要性不仅仅体现在其对维护公共安全和经济价值的直接贡献上，而且还在于它为工程结构的寿命周期管理提供了一种动态和实时的评估手段^{[1]-[3]}。通过对应力^[4]、应变^[5]、振动特性^[6]、位移与变形^[7]、裂缝宽度^[8]、腐蚀程度^[9]以及环境与操作载荷^[10]等结构关键信息的连续监测，SHM 系统能够揭示结构在现实工作条件下的实际行为和性能，及时识别结构性能退化的早期迹象。这种监测策略的核心在于预防性维护，旨在通过早期识别潜在的结构损伤和缺陷，避免结构事故的发生，保障人员安全，同时减少因紧急维修或更换而带来的高昂成本。

传统的结构健康监测方法主要依赖于有源有线的传感系统，这些系统通过直接连接到结构的各个部位上的传感器来收集数据^[11]。这些传感器能够监测结构的应力和应变、振动和动态响应、位移和变形、裂缝宽度、腐蚀情况，以及温度和湿度等等。尽管这种有线监测方法在数据的准确性和可靠性方面表现优异，但它也存在一系列的局限性。比如，有线系统的安装和维护成本高，对于大型或难以接近的结构来说，布线工作尤其复杂和费时。此外，有线系统的灵活性有限，一旦安装便难以调整或升级，这在长期运营中可能导致效率低下和增加额外的成本^[12]。

随着无线通信技术的发展，尤其是天线技术的进步，无线甚至无源的监测方法开始在结构健康监测领域显示出其独特的价值。与有源有线系统相比，利用天线技术的无线监测系统提供了一种更为灵活和成本效益高的解决方案。无线传感器网络（WSN）^[13]可以部署在结构的关键位置，无需复杂的布线工作，这不仅大大降低了安装成本，也提高了系统的适应性和可扩展性。在这一框架中，天线传感技术（AST）将天线直接整合作为感测单元，允许其监测并反馈由于结构变化导致的天线电磁属性的变化^[14]，例如谐振频率的偏移和阻抗的调整，从而提供精准的结构健康数据。更进一步，无源的监测技术，如基于射频识别（RFID）^[15]的天线技术，能够利用从外部或结构本身产生的能量进行操作，进一步降低了能耗和维护需求。这种集成的天线传感器技术提供了对结构健康状况的实时、连续监控，极大地增强了监测系统的实用性和效率。

在天线技术得到广泛应用的基础上，分形天线作为一种先进的天线设计理

念，因其独特的特性和多样的应用潜力，开始受到结构健康监测领域的关注^[16]。分形天线利用自相似的分形几何设计，不仅具有尺寸小、重量轻的优点，还能通过多级缩放结构实现宽带和多频带操作^[17]。这些特点使得分形天线在不同的频率范围内具有出色的辐射和接收性能，非常适合用于需要多频通信的无线传感网络。

分形天线的另一个显著优势在于其灵活的设计性，可以根据具体应用的需求定制天线的形状和大小，从而优化其性能和适应性^[18]。这使得分形天线在空间受限或形状不规则的应用环境中表现尤为出色，如已有的一些应用在可穿戴传感设备^[19]和电子元件^[20]中的分形天线，它们不仅不会影响设备整体的完整性，还能提供稳定可靠的信号传输。

分形天线虽然在结构健康监测领域的应用展现出了巨大的潜力，但其研究和应用尚处于初级阶段。面对未来的技术需求，尚存若干关键挑战需解决^[21]。对于进一步小型化的问题，尽管已实现较高的集成度，但对于更加严苛的空间限制和复杂环境的适应性仍需优化。其次，在传感灵敏度方面，虽然分形天线响应频率范围宽、灵敏度高，但在极端环境和复杂电磁干扰下保持高准确性仍是技术难点。此外，应用场景的拓展也是重要方向，如何将技术应用于更多工业场景，特别是动态环境和极端气候条件下的应用，需要深入探索。未来，通过针对这些挑战的研究，分形天线传感器有望在提高结构安全和优化维护中发挥更大的作用。

1.2 结构健康监测中的天线传感器研究概述

在结构健康监测领域，目前学者们已研究出了多种功能不同的天线传感器。这些传感器根据其功能主要可以划分为三大类：用于监测温度、湿度、酸碱度等环境变化的天线传感器^[22]、用于监测结构应力应变的天线传感器^[22]，以及用于区分、鉴别材料种类的天线传感器^[23]。为了实现不同的监测功能，研究者采用了不同的测量电磁参数作为传感器的测量参数，目前应用较多的电磁参数有谐振频率、相位、振幅等。下文会对这三类传感功能中具有代表性与创新特点的一些天线传感器及其传感原理进行介绍。

1.2.1 用于监测环境变化的天线传感器

环境变化通常指自然或人为因素引起的温度、湿度、酸碱度、大气压力等环境参数的变动。这些变化对结构健康监测至关重要，因为环境条件的波动可能会加速结构材料的老化、腐蚀或损伤，从而影响结构的稳定性和安全性^[24]。

直接通过天线作为传感器来感知温度和湿度，主要依赖于天线的物理或电学特性对环境因素（如温度和湿度）的敏感性。这类传感器通常利用天线的谐振频率、阻抗、回波损耗以及带宽等特性的变化来检测环境变化。

Cheng 等^[25]提出了一种专为高温环境设计的无线被动温度传感器，该传感器采用了谐振器与天线的集成设计，传感原理如图 1.1 所示。传感器的核心是一个谐振器，使用氧化铝等材料作为基材。氧化铝的介电常数随温度的升高而增加，这种物理特性是传感器工作的基础^[26]。介电常数的增加直接导致谐振器的谐振频率降低。当温度从 50° C 增加到 1000° C 时，氧化铝的介电常数从 9.7 变化到 11.2，相应地，谐振频率也从 5.12 GHz 降至 4.74 GHz。这种频率的变化可以通过外部设备，如频谱分析器，进行无线检测，从而实现了对温度的精确监控。

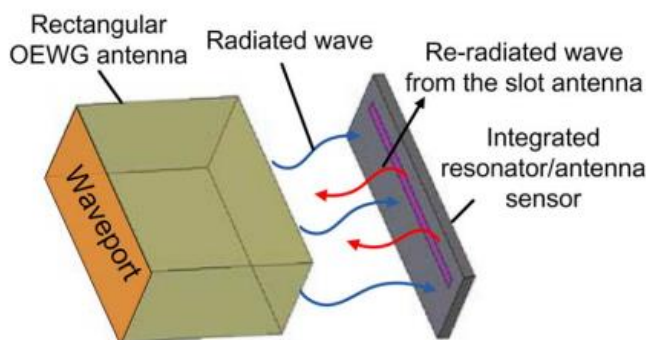
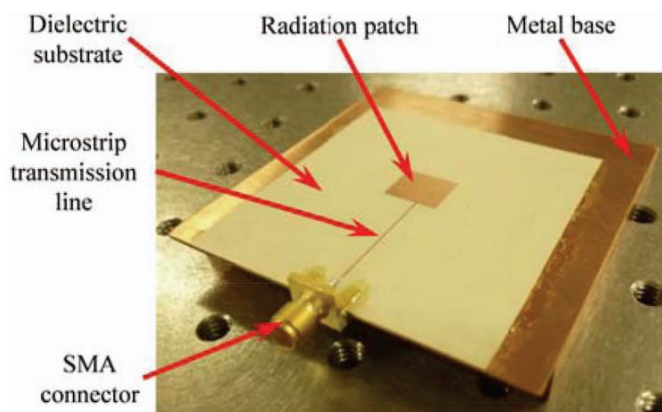
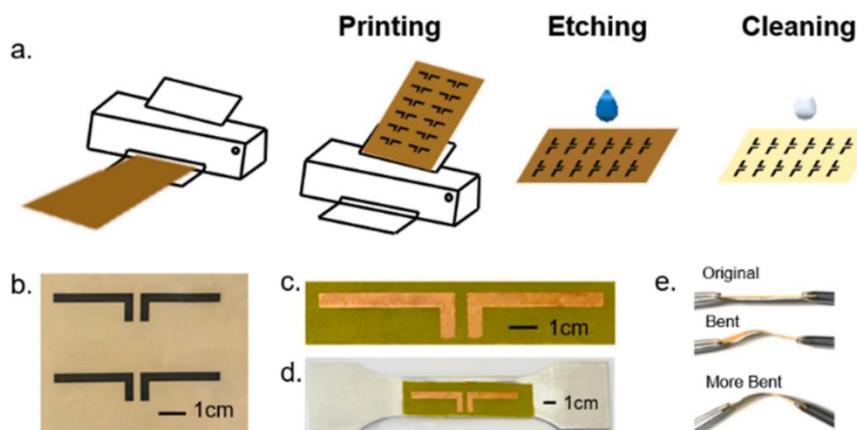


图 1.1 集成谐振器/天线传感器的无线被动温度传感原理示意图^[25]

微带贴片天线作为温度传感器的核心工作原理基于其谐振频率的变化，谐振频率受天线基板的介电常数和天线贴片的物理尺寸双重影响，而介电常数和物理尺寸均随温度变化而变化。随着环境温度的升高，天线基板材料（如聚四氟乙烯）的介电常数会增加^[27]，同时天线的辐射贴片由于热膨胀会发生物理尺寸的扩展。这两种变化共同作用，导致天线的谐振频率发生移动。如图 1.2 所示，Sanders 等^[28]通过在不同的金属基底上粘贴天线传感器，并在温度控制室中进行了一系列测试，通过比较实测的温度与频率关系与理论模型的预测，验证了通过测量天线谐振频率变化来监测和推断环境温度变化的有效性和准确性。

图 1.2 Sanders 提出的微带贴片天线温度传感器实验试件^[28]

Zhang 等^[29]提出了一种能够同时监测应变和湿度的偶极子天线传感器，该天线传感器采用多模天线设计，允许在不同的谐振频率下操作，每个频率对应不同环境因素的感测模式，从而能够同时监测应变和湿度^[30]。湿度变化通过影响天线材料的电磁特性（主要是介电常数）进而改变天线的谐振频率，该天线传感器的湿度感知灵敏度高达 12.38 MHz/%RH。且如图 1.3 所示，该天线传感器采用柔性材料制作，制作工艺简单、尺寸小，提高了监测的灵活性和效率。

图 1.3 Zhang 提出的柔性偶极子天线传感器的制作过程与实物示意图^[28]

Yi 等^[31]提出了一种贴片天线湿度传感器监测水泥凝结时间的传感方法。作者利用贴片天线的三个电磁参数（回波损耗、带宽和谐振频率）与上覆水泥介电常数变化的关系，定量监测水泥的凝结时间。其中水泥随着水化过程的进行，含水率降低，湿度减小，水泥的介电常数下降，同时导致贴片天线的回波损耗降低、带宽减小、谐振频率提升。水泥的介电常数与这三个电磁参数均有较好的线性关系，且三个参数受到的环境其他因素干扰是不同的，因此可以通过同时测量这三个参数来减少环境影响带来的误差。

1.2.2 用于监测结构应力应变的天线传感器

监测结构的应力和应变在结构健康监测中至关重要，因为它们能够提供关于结构承载能力和完整性的直接信息，帮助预测和预防结构损伤或失败。通过及时识别由于过载、疲劳或环境因素引起的应力和应变变化，可以实施有效的维护策略，从而延长结构的使用寿命并确保其安全运行^[32]。

应力应变天线传感器利用天线的电磁属性变化来监测结构的物理变化。这些传感器包括基于谐振频率、阻抗、散射参数和相位变化的类型，以及结合了光纤技术的高级传感解决方案^[33]。通过测量这些电磁特性的变化，天线传感器能够精确地反映结构应力和应变的状态，从而为结构健康监测提供关键数据。

Wan 等^[34]提出了一种利用频谱传感和射频识别技术测量结构应变的结构健康监测新方案。如图 1.4 所示，该系统中包括一个通过监测天线长度变化导致的谐振频率变化来测量结构应变的贴片天线作为传感器，一个通用软件无线电外设（USRP）^[35]作为测量仪器，以及一个计算机用于数据处理。文章中使用优化的能量检测算法对 USRP 检测的天线频谱进行分析，以实现高精度应变测量^[36]。该贴片天线传感器的应变灵敏度为 $1.7678\text{kHz}/\mu\epsilon$ ，而经过机器学习校正后的测量值与真实应力值的误差为 2.443%。

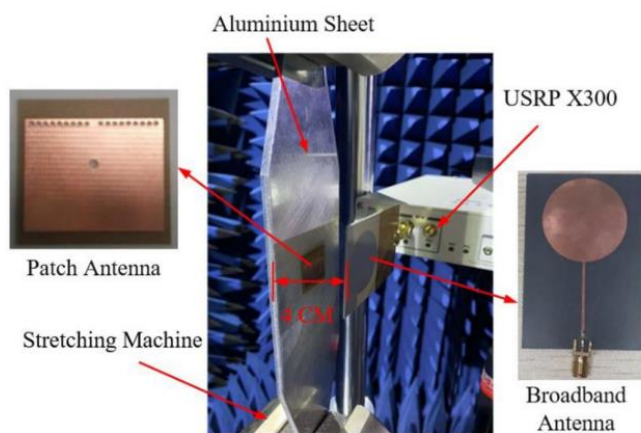


图 1.4 微波暗室中的基于贴片天线和 USRP 的应变传感系统^[34]

Lopato 等^[37]研究了一种用于应力评估的圆形微带天线传感器。这种微带传感器可用于结构健康监测系统，该传感器可以通过测量反射系数 S_{11} 来确定变形/应变值。如图 1.5 所示，该天线传感器粘贴在样品上，施加的应变导致贴片几何形状的变化，并影响贴片和接地平面中的电流分布，变化的电流流动影响谐振频率的值，从而实现应变的测量，该传感器的工作频率为 2.5GHz，直径小于 55mm，灵敏度可达 $1\text{MHz}/100\text{MPa}$ 。除此之外，该圆形微带传感器可以监测两种谐振频率下的应变方向特性，这是目前尚未对任何微带传感器进行的研究，

这种监测方法可以代替应变片^[38]。

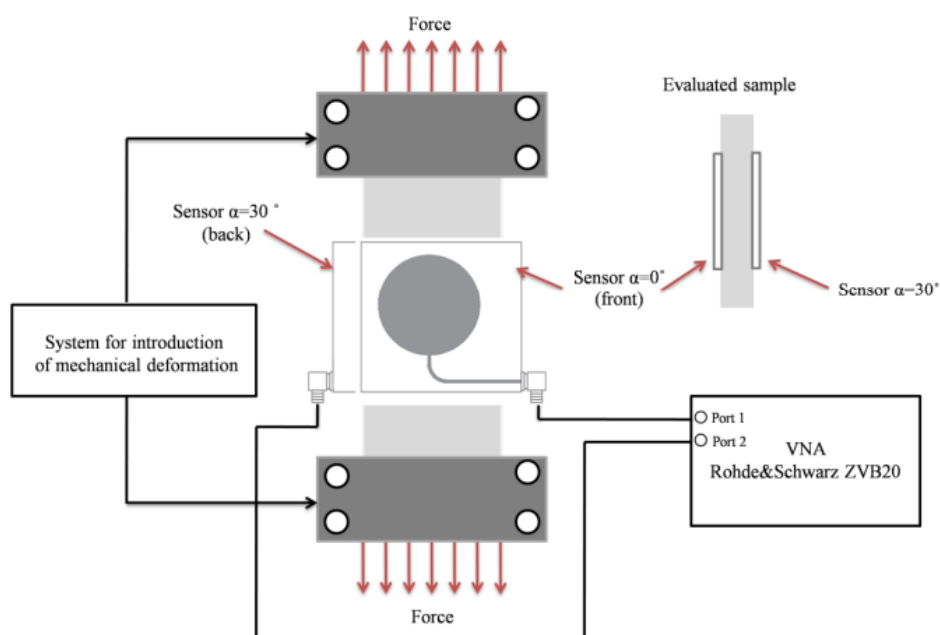


图 1.5 圆形微带天线传感器简化示意图^[37]

Zhang 等^[39]利用射频识别（RFID）技术与微带天线技术相结合的方式，提出了一种 RFID 型微带天线应变传感器，实现了应变和裂纹的无源无线监测。如图 1.6 所示，该传感器将微带天线用作标签天线，通过 RFID 阅读器发射的能量激活标签芯片，然后使用信号调制技术消除环境噪声干扰。天线的谐振频率随着应变或裂纹信息变化而变化，这些变化通过阅读器远程无线查询并记录，且该传感器实测的谐振频率偏移与应变之间的灵敏度为 $0.81\text{kHz}/\mu\epsilon$ ，无线读取距离为 250mm，更适合于大面积结构的应变检测。

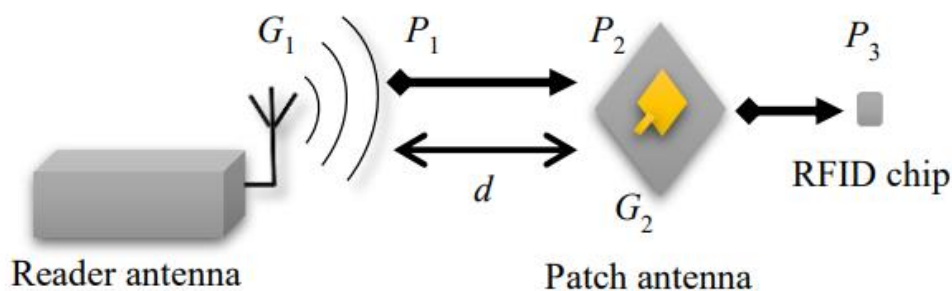


图 1.6 微带天线应变传感器的 RFID 通讯系统示意图^[39]

对于传统的单片应力式贴片天线的传感器来说，应变传递比不完全、结合强度不足以及裂纹扩展的随机性等问题会影响传感器的灵敏度，并使校准过程复杂化^[40]。无应力天线传感器可以较好地解决这些问题，是测量位移或裂缝宽

度的替代解决方案。Caizzone 等^[41]提出了一种由两根相互耦合的平面倒 F 天线组成的裂纹传感器，利用耦合天线的相位作为传感参数，以相位变化来表示两根天线之间距离的变化。该传感器的灵敏度效果很好，当测量裂缝宽度时，裂缝宽度几乎等于两根天线之间的距离变化。

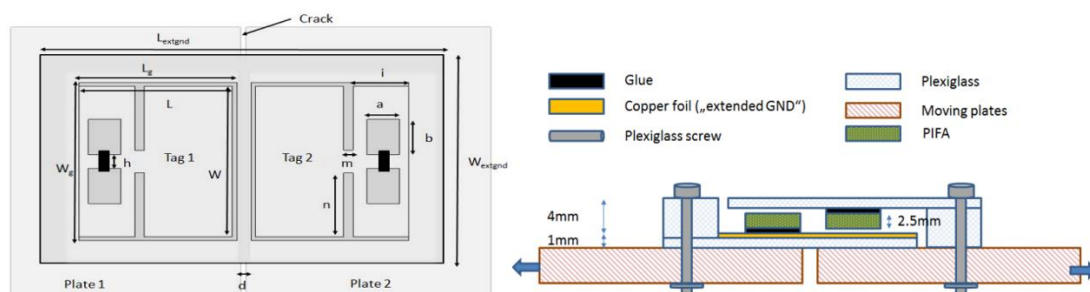


图 1.7 耦合式平面倒 F 天线裂纹传感器模型示意图^[41]

1.2.3 用于材料检测与分类的天线传感器

在结构健康监测中，材料检测与分类至关重要。通过天线传感器可以识别并区分结构中使用的各种材料类型，如液体、固体以及其他复合材料。这种识别帮助评估材料的条件和适用性，预测并防止潜在的结构问题。天线传感器在材料检测与分类中主要可以分为几种类型：基于电磁波反射和透射特性的天线传感器，通过分析材料对电磁波行为的影响来区分材料类别^[42]；基于天线阻抗监测的传感器，利用材料对天线周围电磁环境的影响引起的阻抗变化来分类材料^[43]；以及基于谐振频率监测的传感器，通过观察材料对天线谐振频率的影响来识别不同材料的电磁特性^[44]。这些技术提供了一种有效的手段来实时监控和分类结构中的材料，确保结构的完整性和安全。

Saghlatoon 等^[45]开发了一种全组合式传感器-天线发射系统，用于无线测量材料的相对介电常数。传感天线的 3D 结构示意图、等效电路图及传感侧视图如图 1.8 所示该系统通过发射(Tx)天线在微波频率下检测样品，并将介电常数通过射频振荡器转换为载波信号的工作频率。此外，还能在载体上进行 ON-OFF 键控调制作为 RFID 信息传输。接收端通过解调系统恢复载波频率，从而数字化得到样品的介电常数。该设计利用了完全被动的元件，不增加系统功耗，使得传感器在物联网应用中尤为理想。这种新型无线传感器节点在执行传统通信任务的同时，还能通过天线表征被测材料，提供一个简化而实用的解决方案，适合 RFID 或 NFC 系统使用。

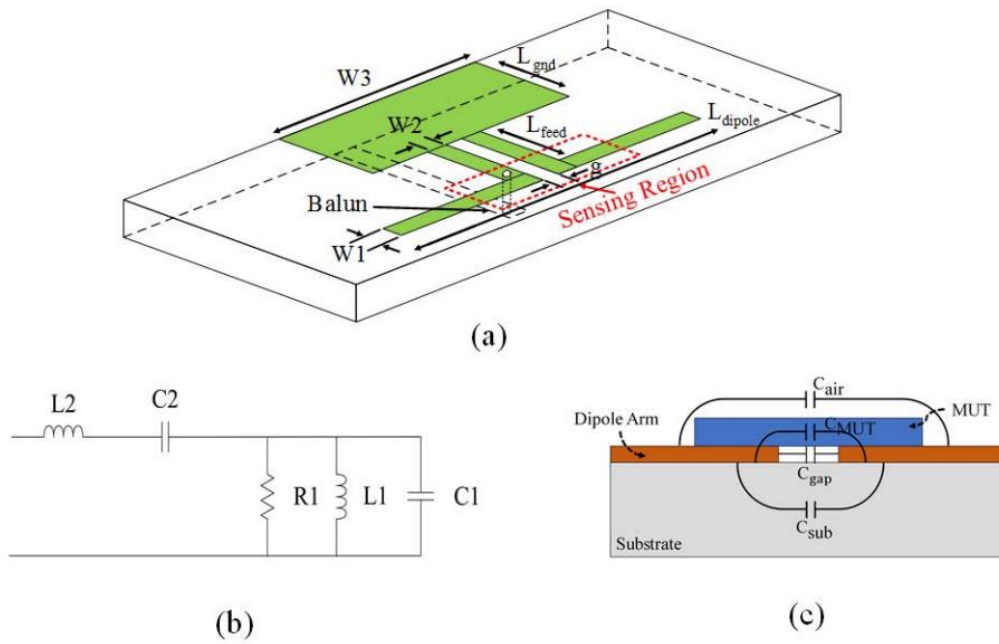


图 1.8 Saghlatoon 的天线传感器的结构示意图(a)、等效电路图(b)及传感侧视图(c)^[45]

Colegrave 等^[46]提出了一种利用天线结合人工神经网络来进行无接触液体材料分类的技术。如图 1.9 所示，研究者采用四端口天线结构对液体进行非接触传感和表征，将输出功率为 17 dBm 的标准增益喇叭天线放置在距离 500 毫升塑料容器 50 厘米的地方，系统监测了水和 95%乙醇两种样本液体的响应。通过在 3-3.15 GHz 频率范围内分类测量的微波响应，研究者利用训练有素的神经网络进行分析，实现了 94.44%的分类准确率。

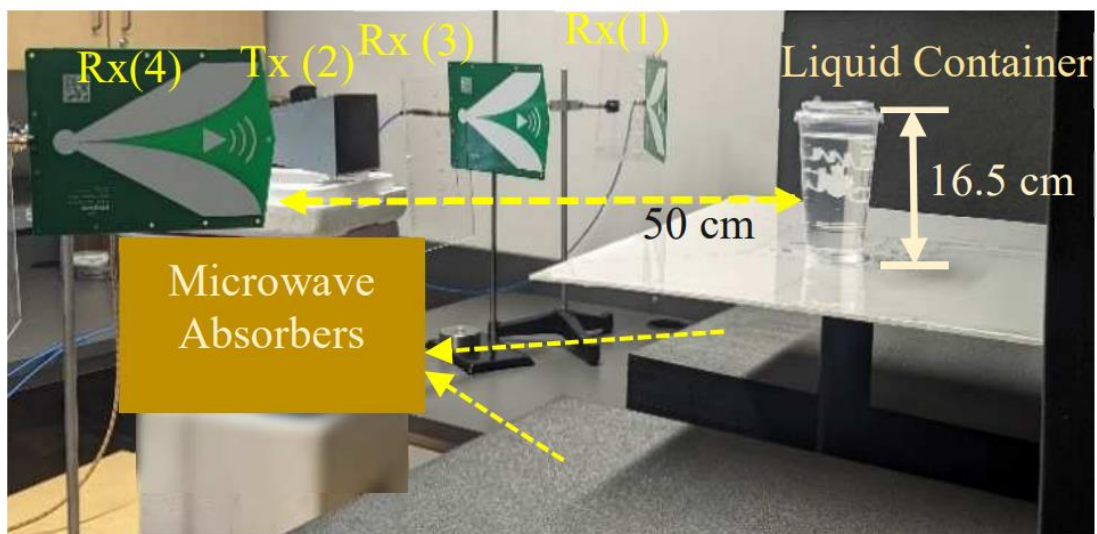


图 1.9 四端口天线液体分类系统的实验装置^[46]

Kazemi 等^[47]提出了一种嵌入在超疏水织物下的长距离天线传感器，可用作

个人防护织物中的可穿戴传感器。这种传感器能够检测和监测织物外层的危险水溶液，为在危险环境中工作的专业人员提供额外的安全层。研究中设计了一个修改过的贴片天线，包括一个蜿蜒形状的谐振结构，被嵌入到织物之下，并利用了二氧化硅纳米颗粒和低表面能的氟硅烷准备了超疏水织物。研究测试了代表危险水溶液的 4 至 20 微升液滴在织物上的性能。通过天线传感器对处理过和未处理的织物进行了 2 至 3 米距离的长距离（S21）测量，成功检测了两种类型的织物上的液体。处理过的织物表现出超疏水性的天线传感器的谐振频率灵敏度为 $370 \text{ kHz}/\mu\text{L}$ ，未处理织物为 $1 \text{ MHz}/\mu\text{L}$ 。

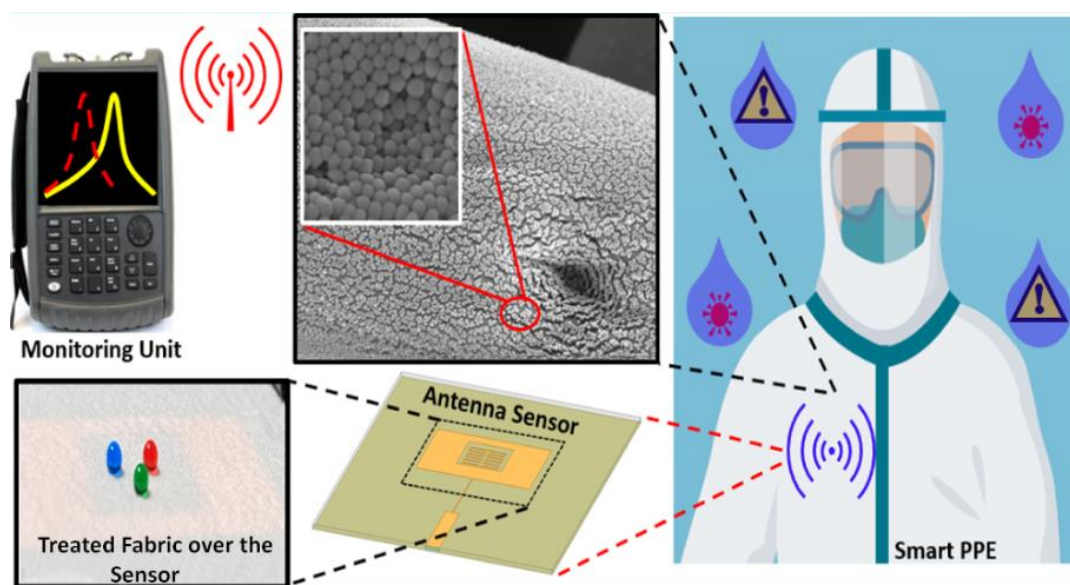


图 1.10 可穿戴式液体检测天线传感器概念图^[47]

Jun 等^[48]开发了一种基于不同液体介电常数影响的天线传感器技术。如图 1.11 所示，研究者通过在平面电磁带隙（EBG）结构中切割沟槽并填充具有不同介电常数的液体，成功地改变了 EBG 结构的反射相位，并将一个带共面波导（CPW）馈线的改进型圆形缝隙天线安装在沟槽阵列的中心上方。该传感器通过调整沟槽中的液体介电常数来调谐天线的谐振频率，并测试了包括丁醇、丙二醇、乙醇和甲醇在内的四种不同介质，初步结果显示，该传感器对无损材料展现出良好的灵敏度和线性响应。这项技术也适合用于其他可重构天线系统，例如石蜡^[49]等液体。

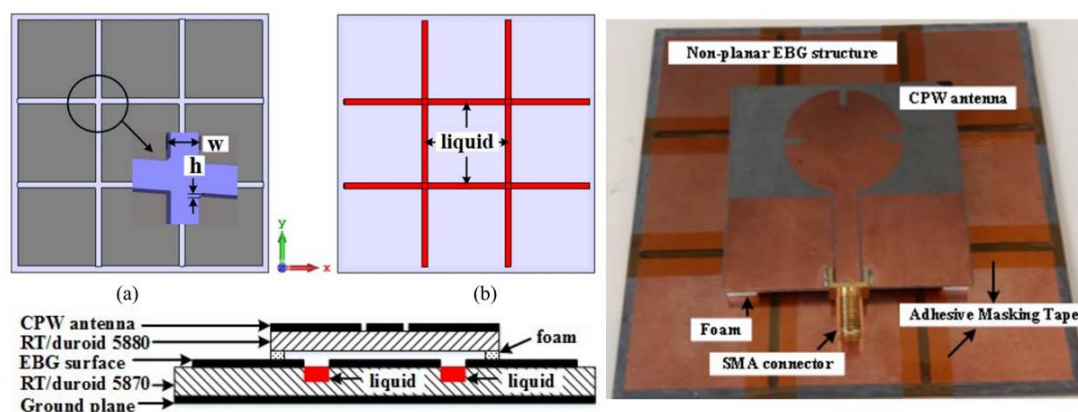


图 1.11 基于 EBG 结构的液体检测传感器 [48]

1.3 分形天线研究概述

1.3.1 分形理论与经典分形形式

1.3.1.1 分形理论简介

分形理论是一门探索自然和数学中重复出现的复杂模式的学科。分形这一术语源自拉丁语“fractus”，意味着“破碎的”或“不规则的”，这恰如其分地描述了分形形状的非常规和碎片化的性质。分形的概念首次由法国数学家本诺特·曼德布罗特在 20 世纪 70 年代提出，他在研究经济学的波动模式时发现，无论是从宏观还是微观层面观察，市场的波动模式都显示出惊人的相似性。曼德布罗特将这种现象推广到各种自然和数学形态中，从而引入了分形理论，这种理论不仅在数学中，在物理、地理、艺术甚至音乐领域都有重要的应用^[50]。



图 1.12 自然界中的分形现象

分形具有自相似性、分形维数以及细节丰富性等核心特性。

自相似性是分形理论的核心特性之一，自相似的对象在不同的尺度上展示出几乎或完全相同的形态^[51]。这种特性可以是严格的自相似，即对象在所有尺度上完全相同，如数学上的谢尔宾斯基三角形^[52]；也可以是统计自相似，即对象在统计特性上显示出相似性，这种类型更常见于自然界的分形，如海岸线和云朵。自相似性揭示了一个有趣的现象：无论观察者观察的深入程度如何，分形结构都能展示出复杂的细节和一致的模式。这一性质使得分形理论成为描述和理解自然界中许多复杂系统的一个强大工具。

分形维数^[53]是衡量分形复杂性的一个重要工具，它提供了一种方式来描述分形结构的空间占据特性。在传统的欧几里得几何中，线段是 1 维，平面是 2 维，而立体是 3 维。然而，分形结构由于其重复的复杂模式，通常表现出非整数的维数。例如，科赫雪花分形^[54]的维数约为 1.2619，这表明它比一条线更复杂，但没有达到二维平面的复杂度。分形维数的计算通常依赖于对分形结构进行不断细分的方法，每次细分都会揭示出更多的细节，而这些细节的数量与分割的尺度呈对数关系。分形维数不仅提供了一个量化分形复杂性的度量，还帮助科学家在各种科学领域理解和模拟复杂结构的行为。

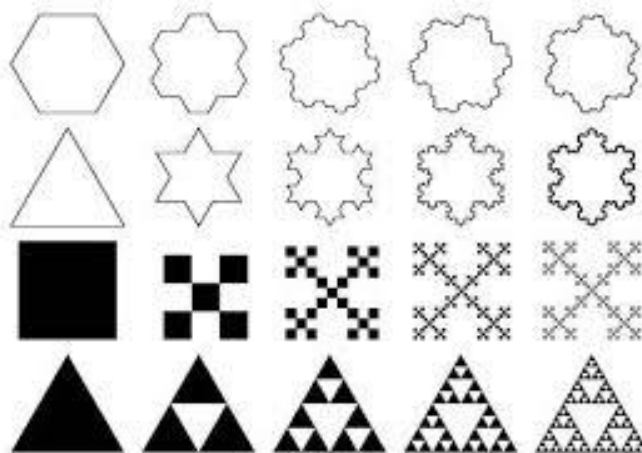


图 1.13 分形维数概念的示意图

分形的另一个显著特性是它们无论在何种放大倍数下都能展现出丰富的细节。这意味着，无论将视角放得多么细致，分形结构都会展示出新的、未曾见过的特征，这与传统的几何形状如圆形或正方形截然不同，后者在一定放大倍数后，不会呈现出新的结构信息。分形的这一特性使得它们非常适合于模拟自然界中那些复杂且详细的形态，如树木的枝干、血管系统、山脉轮廓等^[55]。这种无尽的细节也让分形成为艺术家和设计师的灵感源泉，他们使用分形原理来创作视觉上无限丰富和引人入胜的艺术作品。

1.3.1.2 经典分析形式简介

分形理论揭示了自然界和数学领域中复杂结构的底层规律，经典的分形形式通常通过简单的迭代过程产生，这些过程无限重复应用于一个初始形状，逐渐演变成复杂的无限细节结构。本小节会介绍七种具有代表性的经典分形模式。

曼德布罗特集 (Mandelbrot Set) ^[56]：这是最著名的数学分形之一，由本诺特·曼德布罗特在 20 世纪发现。曼德布罗特集以其复杂的边界和美丽的图形而闻名，是混沌理论和分形几何的象征。该集合在复平面上定义，具有无限的自相似结构，常被用于计算机生成艺术和视觉效果中。

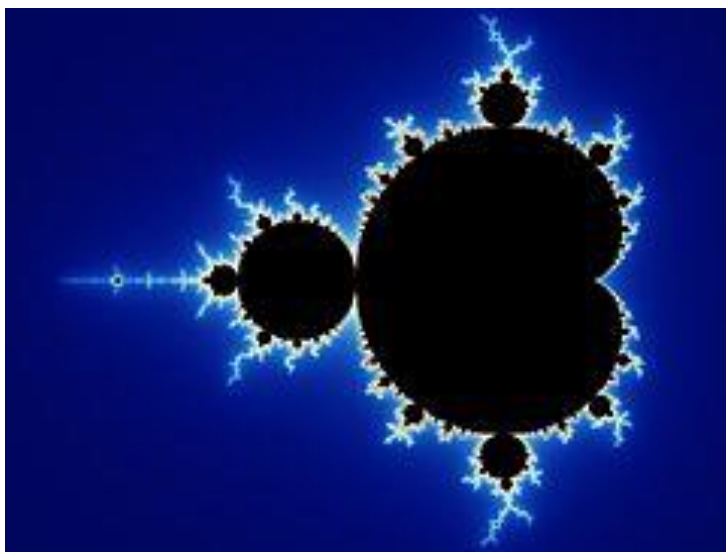


图 1.14 曼德布罗特集 (Mandelbrot Set)概念示意图

谢尔宾斯基三角 (Sierpinski Triangle) ^[57]：这是一种简单的递归分形图案，由重复去除等边三角形中间部分形成。它的结构在每个缩放级别上重复出现，广泛应用于计算机图形学教学和理论演示中。



图 1.15 谢尔宾斯基三角 (Sierpinski Triangle)迭代示意图

科赫雪花 (Koch Snowflake) ^[58]：由瑞典数学家 Helge von Koch 提出，这种分形通过在等边三角形的每条边上不断添加新的三角形来形成。科赫雪花展示了如何从一个简单的形状开始，逐步构建出复杂的边界，是研究无限周长与有限面积问题的经典例子。

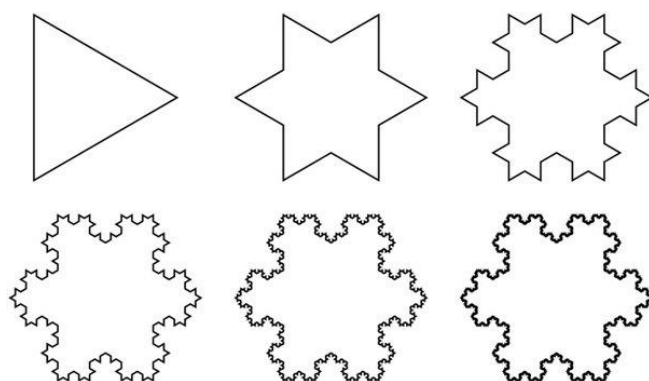


图 1.16 科赫雪花 (Koch Snowflake) 迭代示意图

闵可夫斯基香肠式分形 (Minkowski Sausage) [59]: 这种分形由德国数学家赫尔曼·闵可夫斯基提出, 以其迭代增长的独特结构闻名。从一个基本的几何形状出发, 如直线或正方形, 每次迭代在现有边界上添加相同的形状, 通常是小方块或凸起, 逐步增加复杂性和细节。这种自相似的分形模式在计算机图形学和艺术设计中被广泛使用, 以其迷人的视觉效果吸引观察者。



图 1.17 闵可夫斯基香肠式分形 (Minkowski Sausage) 迭代示意图

希尔伯特曲线 (Hilbert Curve) [60]: 由大卫·希尔伯特设计的空间填充曲线, 通过迭代过程连续填满二维空间。从一个简单的正方形开始, 逐步将其分为四小部分, 并用曲线连接这些部分的中心, 每次迭代复制并缩小前一次的结构, 逐渐增加复杂性。希尔伯特曲线在数据存储和图像处理中特别有用, 因其能够维持相邻数据点的物理邻近性。

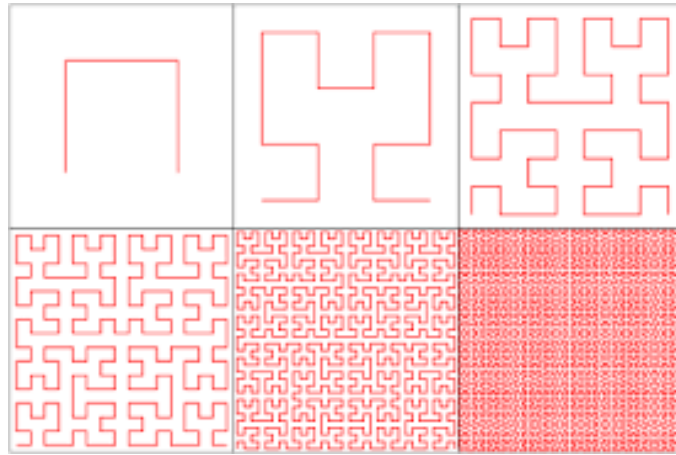


图 1.18 希尔伯特曲线 (Hilbert Curve) 迭代示意图

龙形曲线 (Dragon Curve)^[61]: 这是一种通过折纸或迭代步骤生成的分形曲线，形状类似于蜿蜒的龙。它在数学可视化、艺术设计以及技术分析中被广泛使用，特别是在信号处理和折纸艺术中。

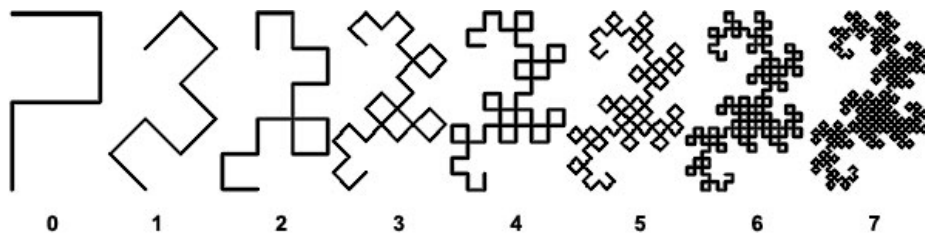


图 1.19 龙形曲线 (Dragon Curve) 迭代示意图

朱利亚集 (Julia Set)^[62]: 与曼德布罗特集密切相关，朱利亚集由法国数学家 Gaston Julia 研究。每个朱利亚集都与一个特定的复参数有关，展示了复杂而迷人的图案。这种分形经常被用于动态视觉效果的生成和高级计算机图形设计中。

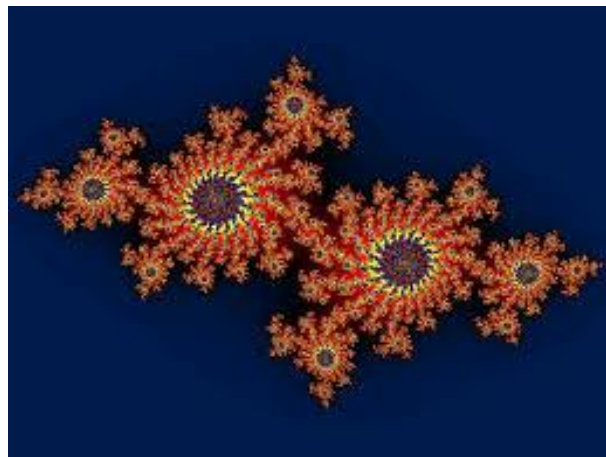


图 1.20 朱利亚集 (Julia Set) 概念示意图

1.3.1.3 分形理论实际应用简介

分形理论不仅是一个纯数学的概念，它在现代社会和科技发展中有广泛的应用。从自然界的模式到技术产品的设计，分形理论在通信技术、计算机图形学、医学、环境科学与地理学、市场分析与艺术设计等方面都有具体实际的应用，这些应用成果也体现了分形理论深远的影响。

在通信领域，分形天线^[63]是分形理论的一个典型应用。分形天线利用分形几何的自相似性质，这使得它们能够在多个频率上工作，非常适合现代多频通信系统。这些天线的设计基于分形的迭代构造过程，可以在极小的空间内实现宽带和多带性能。例如，分形天线常用于手机和其他便携式设备中^[64]，因为它们可以在不增加物理尺寸的情况下，有效地覆盖广泛的频率带宽。此外，分形天线的设计还可以减少天线的表面积和体积，有助于降低设备的整体重量和成本。分形天线的这些特性使其在军事、航空和汽车等行业中得到了广泛的应用，尤其是在对设备尺寸和多功能性有严格要求的场合^[65]。

在计算机图形学中，分形理论用于生成逼真的自然景观，如山脉、云层和植被等^[66]。通过使用基于分形的算法，如 Perlin 噪声^[67]和曼德布罗特集，设计师可以创建复杂且细节丰富的虚拟世界。这些算法能够在不牺牲渲染速度的情况下，生成大规模的自然环境，这在电影制作、视频游戏和虚拟现实应用中尤为重要。例如，在电影《阿凡达》中，大量使用分形算法来创建丰富多彩的外星世界，其中的植物、地形和云层都展现了分形的复杂美学。此外，这些技术也使得动画师能够在不需要手动绘制每一个细节的情况下，快速生成大量的视觉元素。

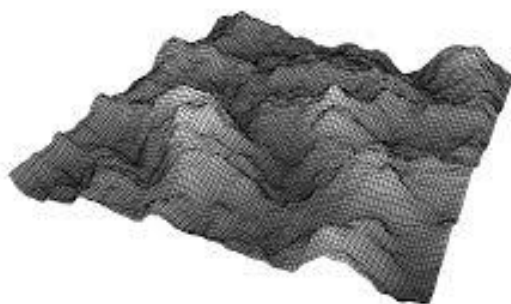


图 1.21 利用 Perlin 噪声生成的虚拟地面模型

在医学领域，分形理论被用来分析复杂的生物结构，如肺部的气管分布和血管网络^[68]。这些结构显示出明显的分形特征，研究这些特征有助于了解其功能和效率。例如，肺部的分支结构使得气体交换过程极为高效，这是因为气管的分形分布提高了气体与血液的接触面积。在诊断和治疗方面，通过分析肿瘤生长的分形特征^[69]，医生可以更好地理解其侵略性和生长模式，这对于癌症的

早期诊断和治疗计划的制定非常重要。分形分析也被应用于心血管疾病的研究^[70]，如通过研究心率变异性的分形模式来评估心脏病患者的健康状况。

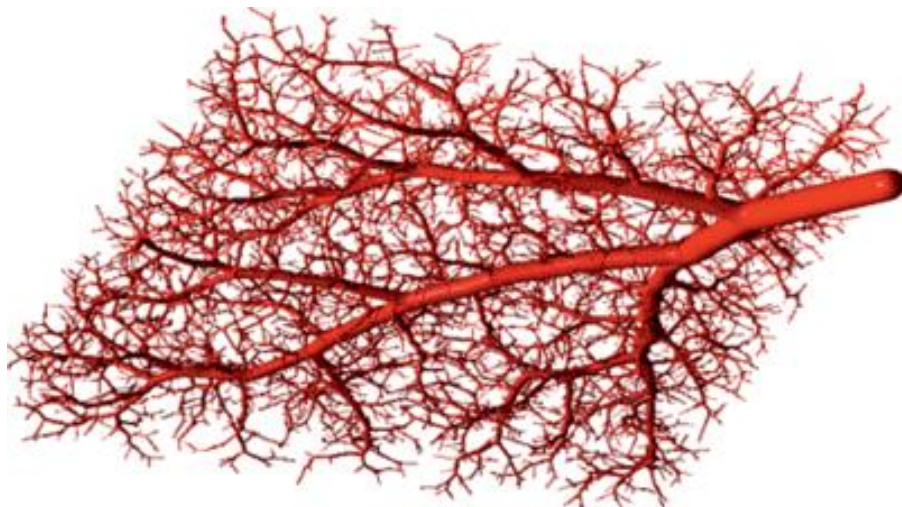


图 1.22 人体血管结构局部示意图

在环境科学中，分形理论的应用主要涉及地形、植被和河流网络的分析。地形的分形特性可以用来预测和模拟侵蚀和沉积过程，而河流的分形网络有助于研究水流的分配和流域的水文特性^[71]。例如，通过分析河流的分形维数，科学家可以预测洪水的发生和流域的排水能力。此外，分形理论也被用于森林景观的管理和保护^[72]，通过分析植被分布的分形模式，可以有效地监控和预测森林火灾的扩散路径。

Blackledge 等^[73]系统地整理了分形理论在金融市场分析中帮助分析师识别价格波动的模式和趋势的具体应用。市场价格的分形特性表明，即使在不同时间尺度上，价格波动也呈现出自相似的模式。该发现对于构建更有效的交易策略和风险管理模型至关重要。例如，利用分形特性分析的洞察模型，交易者可以在复杂的市场条件下识别潜在的买入和卖出点，从而优化其投资组合的表现。

在艺术设计领域，分形理论激发了创新和多样化的应用^[74]。艺术家通过利用分形的自相似性质和复杂结构，在绘画、雕塑和数字艺术中创造出视觉冲击力极强的作品。时尚设计师将分形图案应用于服装和饰品，通过其独特的重复与变化特征提供新颖的视觉体验。同时，建筑师在建筑设计中运用分形理论，优化自然光利用、空间布局和视觉连续性，创造功能性与美学并重的建筑作品。此外，装饰艺术中也广泛使用分形图案，以增强空间的和谐与美观。



图 1.23 分形图案设计的项链与街道地面

1.3.2 分形天线简介

分形天线的概念起源于 20 世纪 80 年代和 90 年代，当时研究者开始探索将分形几何理论应用于天线设计。这一概念最早由 Nathan Cohen 在 1995 年提出并进行了专利化^[18]。Cohen 是一位无线通信领域的研究者和分形天线技术的先驱，他发现通过应用分形的自相似特性，可以设计出在多个频段内自然谐振的小型天线。Cohen 的研究开辟了利用分形几何构造电磁辐射器和天线的新途径。分形天线由此成为了一种独特的解决方案，特别适用于需要小型化同时具备多频段操作的通信系统。

1.3.2.1 分形天线的特点

由于分形天线是利用分形理论的产物，故与分形的特性相似，分形天线主要具有自相似性、可迭代性和高空间填充性这三个核心特点，这些独特的几何特性使其在设计和性能上具有显著优势，为现代无线通信和电子设备提供了高效、紧凑和多功能的解决方案。

自相似性是分形天线最显著的特征。自相似性意味着天线的几何结构在不同的尺度上都保持相同或相似的形态。这种自相似性来源于分形几何学，允许天线在不同的频率上具有类似的电磁特性。具体来说，自相似性使得天线能够在多个谐振频率下工作，每个频率对应于天线结构的不同尺度。这种特性使得分形天线在多频段应用中非常高效，因为每个缩小版本的天线部分都能在特定的频率范围内有效工作，确保天线在广泛的频谱范围内都能保持高效的性能。

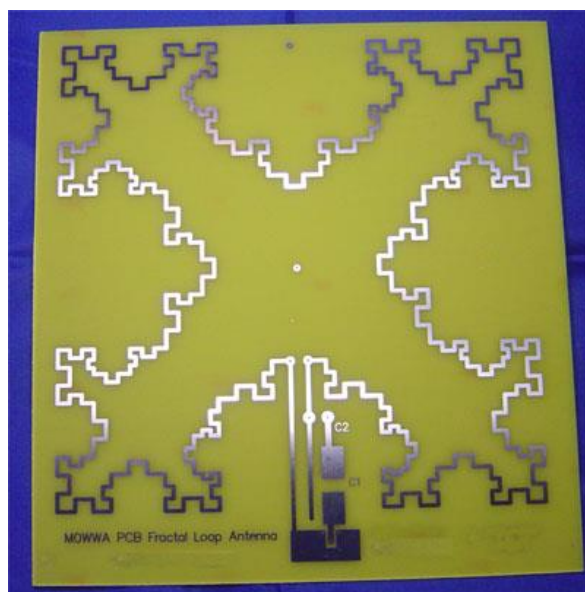


图 1.24 分形天线的自相似性（闵可夫斯基分形）

可迭代性是指分形天线通过多次迭代应用基本几何形状来构建复杂的结构。每次迭代过程都会使天线的电长度和几何复杂性增加，从而扩展其频率范围和优化其辐射特性。迭代结构的设计允许在不同的尺度上增加天线的长度和表面积，这有助于提高天线的辐射效率和增益。通过调节迭代次数和几何参数，可以精细控制天线的电气性能，如阻抗匹配、频率响应和辐射方向图。这种多层迭代结构使得分形天线具有高度的设计可调性和优化空间。



图 1.25 分形天线的分形结构逐次迭代过程（谢尔宾斯基三角分形）

分形天线具有空间填充性，这意味着在有限的物理空间内能够实现极高的

电长度和表面积。高空间填充率使得天线能够在较小的体积内提供较长的电长度，从而在保持紧凑尺寸的同时实现高效的电磁性能。这种特性对于现代电子设备尤为重要，这些设备通常要求天线具有紧凑的尺寸但不牺牲性能。分形天线通过其复杂的几何形状有效利用空间，使其在小尺寸下仍能提供优异的性能，满足移动设备、物联网设备和嵌入式系统的需求。

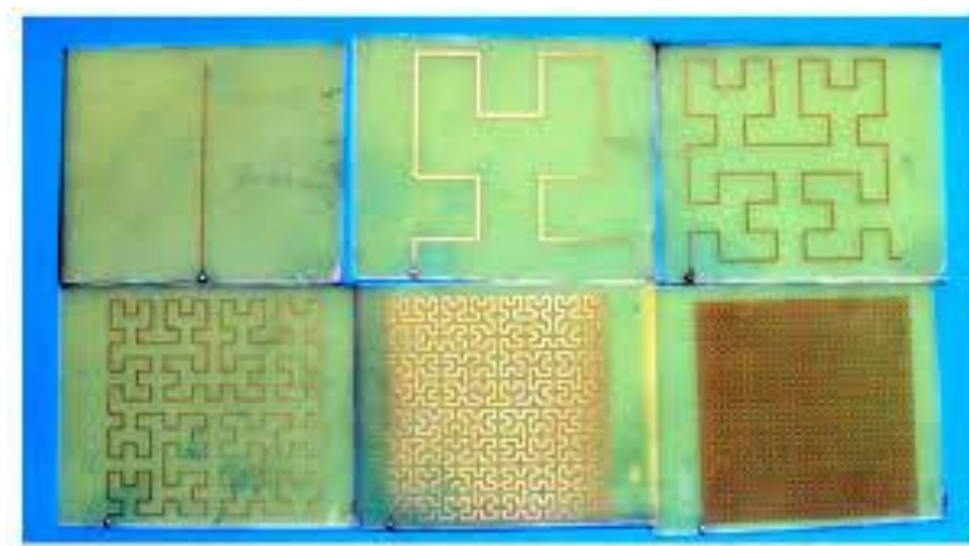


图 1.26 分形天线极高的空间填充率（希尔伯特分形）

1.3.2.2 分形天线的优势

分形天线因其独特的几何设计和先进的多层迭代结构，展现出在现代无线通信和电子设备中极具竞争力的多项优势。分形天线主要具有卓越的宽频带和多频带性能、高灵敏度和选择性、小型化设计、改进的辐射特性以及显著的成本效益等优势，这些优势使其在多样化和高要求的技术应用中表现出色。

分形天线的自相似和多层迭代结构使其能够在广泛的频率范围内有效工作。这种结构使得天线在多个谐振频率上同时工作，从而具备宽频带和多频带性能。宽频带性能意味着天线可以在一个宽广的频率范围内保持稳定的辐射特性和高效的信号传输。多频带性能则指天线能够同时支持多个不同的频段，适用于需要兼容多种通信标准的应用。分形天线的这种能力确保其在不同的通信环境中都能提供可靠的性能，提高了通信系统的灵活性和适应性。

分形天线的设计能够实现高灵敏度和选择性。高灵敏度意味着天线能够有效接收微弱的信号，提高信号接收的可靠性和质量。选择性则指天线能够有效区分和接收特定频段的信号，减少干扰和噪声的影响。分形天线的多层迭代结构和高空间填充率增强了天线的电磁响应，使其能够在复杂的电磁环境中表现出色。这种高灵敏度和选择性对于现代通信系统，尤其是需要高精度和低干扰的应用，如卫星通信和精密测量设备，至关重要。

分形天线的高空间填充率使其在保持优异电气性能的同时，实现了物理尺寸的大幅缩小。小型化设计使得分形天线特别适合于便携式设备、移动通信设备和嵌入式系统，这些设备通常要求紧凑的尺寸和高性能。分形天线的几何结构在有限的空间内提供较长的电长度，从而在不牺牲性能的情况下实现小型化。小型化的分形天线不仅能够满足现代电子设备对空间和重量的严格要求，还能提高设备的美观性和集成度。

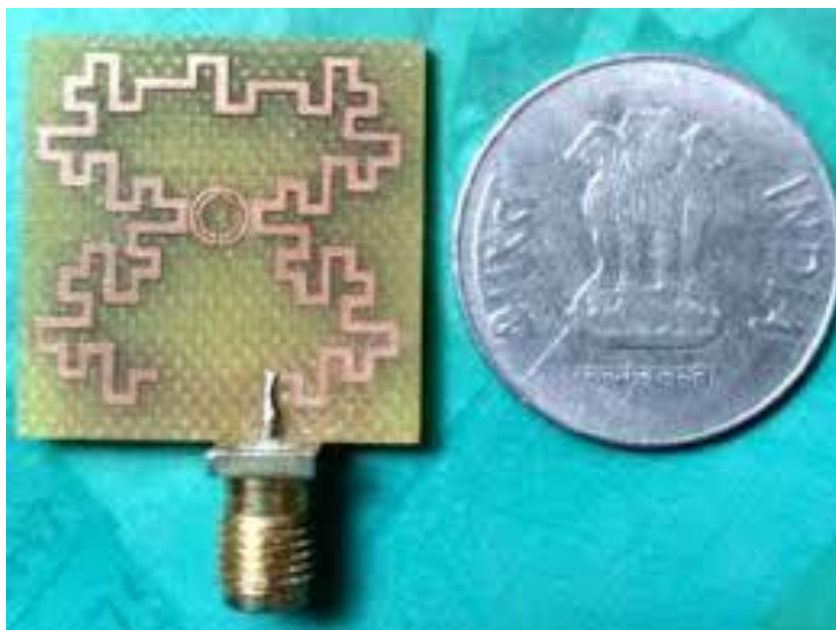


图 1.27 硬币大小的分形天线

分形天线的复杂几何结构和多层迭代设计显著改进了其辐射特性。分形天线可以通过优化其几何形状和迭代次数来实现所需的辐射模式、增益和方向性。改进的辐射特性使天线在不同的应用场景中能够提供更好的信号覆盖和传输效率。分形天线的这种特性使其特别适用于需要高增益和定向辐射的应用，如雷达系统和定向通信。通过优化设计，分形天线还能够减少旁瓣和后向辐射，进一步提高信号传输的效率和质量。

尽管分形天线的设计和制造过程可能较为复杂，但其高效的性能和小型化特性在长期运行中提供了显著的成本效益。小型化设计降低了材料和制造成本，适用于大规模生产。分形天线的多频带和宽频带性能减少了需要多天线系统的需求，简化了设备设计和集成过程，从而进一步降低了总体成本。此外，分形天线的高性能和可靠性减少了维护和更换的频率，进一步提高了其成本效益。

1.3.3 分形天线基本分类简介

李道铁^[75]提出了一种分形天线的分类方法：在广义上，分形天线可以分为

三类：离散自相似分形天线、连续自相似分形天线以及电自相似分形天线。在狭义上，分形天线特指那些基于严格分形几何体构建的、具有多重谐振结构的离散自相似分形天线。这类分形天线进一步细分为分形单元天线、分形阵列天线和分形天线系统。这种分类方式强调了在设计天线时对分形理念的全面应用，以及分形结构在提升天线性能方面的多样化潜力。

随着技术的进步以及方法的创新，出现了许多灵活应用分形理论的天线。从天线功能提升的角度出发，如果设计目的是为了利用分形结构的特性（如自相似的谐振特性，多频带操作、尺寸缩减等），且实际性能表现与这些目标相符，那么这些不能严格符合分形天线传统定义的天线也可以视为是分形天线的一种。

1.3.3.1 分形单元天线

分形单元天线是指在天线设计中应用分形几何学原理以改善性能的天线。这种天线通过在单一天线单元上使用分形结构，来增加多频带和宽带特性，同时优化天线的尺寸与效率。分形单元天线具有多种类型，包括分形贴片天线^[76]、分形缝隙天线^[77]、分形螺旋天线^[78]、分形倒 F 天线^[79]等。这些天线通过分形设计提升了在紧凑空间内的性能，使其在现代通信设备中得到广泛应用。例如，分形倒 F 天线常用于移动设备中，因其能够提供优秀的多频带性能而占据很小的空间。分形螺旋天线提供了良好的圆极化特性，适合需要宽带通信的应用。这些通过分形设计的天线因其高效的空間利用和频率适应性，在现代通信技术中找到了广泛的应用。

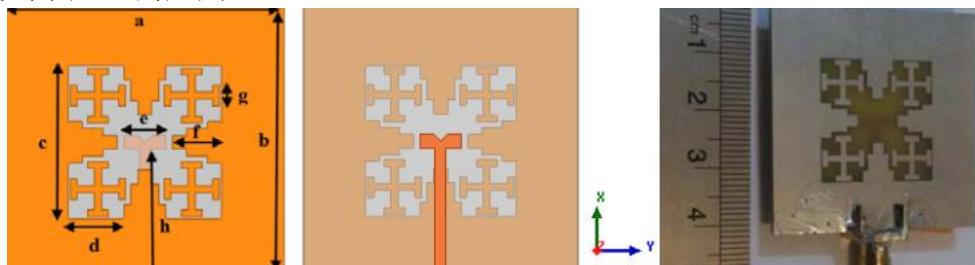
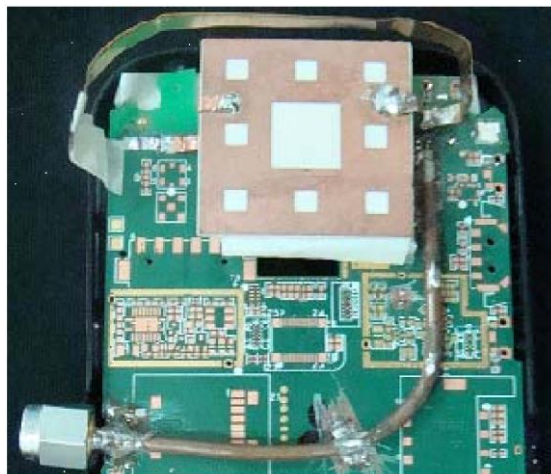
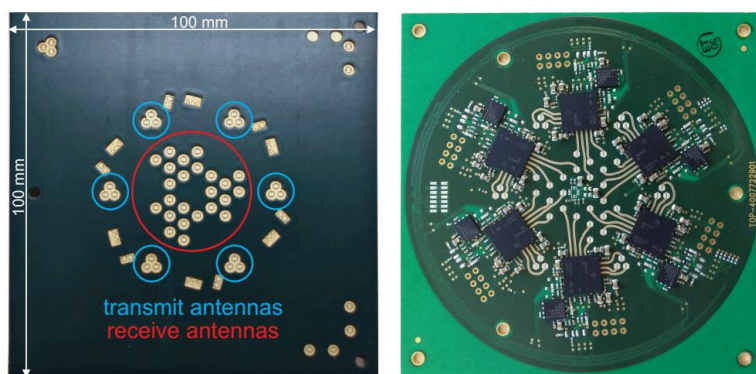


图 1.28 Sedghi 等提出的分形缝隙天线^[77]

图 1.29 Saidatu 等提出的直板手机中的分形倒 F 天线^[79]

1.3.3.2 分形阵列天线

分形阵列天线是一种使用分形设计方法优化整个天线阵列的性能的天线类型^[80]。这种天线通过在阵列的布局或单个天线单元上应用分形几何学，来提高其多频带和宽带特性，同时优化天线的方向性和增益。分形阵列天线特别适合于需要灵活调整波束方向和增益的应用，如雷达系统^[81]和通信卫星^[82]。这种阵列的设计允许在较小的空间内实现更宽的带宽覆盖和更高的数据传输速率。分形阵列天线因其高度自适应和多功能性，在现代高频通信技术中有着重要应用。

图 1.30 Dahl 提出的基于分形天线阵列的 MIMO 雷达系统^[81]

1.3.3.3 分形天线系统

分形天线系统采用全面的分形设计方法，不仅在天线单元和阵列中应用分形几何学，还将这种设计扩展到天线的辅助组件，例如馈电网络、天线罩、反射板、地平面和基板材料。这种综合性的应用使得天线系统在多频带操作、信号的稳定性和方向控制等方面性能得到显著提升。例如，分形光子晶体天线^[83]就是通过在光子晶体结构中应用分形设计来实现精确的波束控制和优化的频率选择性，这在精密的通信和传感领域中特别有价值。这种系统设计虽然复杂，

但在需要高性能和高可靠性的应用中显示出其独特优势。

1.3.4 分形天线实际应用简介

分形天线凭借其独特的自相似性、可迭代性和高空间填充性，在多个实际应用领域中展现出卓越的性能和广泛的适应性。无论是无线通信、卫星通信、军事应用，还是物联网、医学监测和无人驾驶，分形天线都以其多频段操作、紧凑设计和高效性能，为现代技术提供了可靠的解决方案。

1.3.4.1 无线通信

分形天线在无线通信设备中具有广泛的应用，包括手机、平板电脑和无线网络设备。其多频段操作能力使其能够支持多个通信标准，如 2G、3G、4G、5G 以及 Wi-Fi 和蓝牙等。由于分形天线可以在多个频率范围内谐振，设备制造商可以利用单个天线实现对多频段的覆盖，从而减少天线数量，简化设计，提高设备的紧凑性和美观性。



图 1.31 手机中的分形天线

1.3.4.2 卫星通信

在卫星通信系统中，分形天线的宽频带和多频段特性使其成为理想选择。卫星通信通常需要覆盖从 L 波段到 Ka 波段的广泛频率范围，分形天线能够满足这一需求，提供高效的信号传输和接收性能。此外，分形天线的小型化设计有助于减轻卫星的重量和体积，节省发射成本，并提高卫星的有效载荷能力。

1.3.4.3 军事国防

分形天线在军事和国防应用中也具有重要作用。其高灵敏度和选择性使其

能够在复杂的电磁环境中有效工作，用于通信、雷达和电子对抗等系统。分形天线的多频段性能使得单个天线可以同时支持多个频率范围，减少了天线数量，提高了系统的灵活性和可靠性。此外，分形天线的小型化特性便于在各种军事装备中进行集成，提升了装备的隐蔽性和机动性。

1.3.4.4 物联网 (IoT)

物联网设备通常需要小型化、高性能和低功耗的天线解决方案。分形天线由于其高空间填充率和多频段性能，能够满足这些需求。它们广泛应用于智能家居、工业物联网、环境监测和智慧城市等领域。这些设备需要在不同的频率范围内进行通信，分形天线能够在保持小型化的同时，提供稳定的多频段通信能力，确保设备在各种环境下都能可靠工作。

1.3.4.5 医学和健康监测

在医学和健康监测设备中，分形天线被用于可穿戴设备和植入式设备。这些设备需要紧凑、轻便且高效的天线，以确保在人体内或佩戴在身上的情况下仍能进行可靠的无线通信。分形天线的小型化和多频段特性使其能够在有限的空间内实现高效的信号传输，确保数据的准确传输和接收，提高医疗监测的精度和可靠性。

1.3.4.6 无人机和自动驾驶

无人机和自动驾驶汽车需要高效的通信系统来进行导航、控制和数据传输。分形天线的小型化和多频段性能使其非常适合这些应用。无人机需要轻便且高效的天线来减轻重量并延长飞行时间，而自动驾驶汽车需要可靠的通信系统来确保安全和高效的运行。分形天线能够满足这些需求，提供稳定的通信性能和多频段覆盖，确保系统的可靠性和安全性。

1.4 天线传感器增敏方法研究概述

天线传感器的传感灵敏度是指其对外部物理或化学变化的响应能力。提升传感灵敏度对于提高数据的准确性和可靠性至关重要，尤其在结构健康监测、环境监测和医疗诊断等领域中尤为重要。灵敏度越高的传感器能够更早地检测到微小变化，从而允许更早的干预，改善结果。目前比较主流的天线传感器的增敏方法有：材料优化、天线设计改进、信号处理技术以及集成和系统优化等。

1.4.1 材料优化

提升天线传感器灵敏度的一个关键方法是通过使用高性能材料。例如，石墨烯是一种单层碳原子材料，具有卓越的电子和热传导性能，使其在传感器应用中显示出极高的灵敏度。石墨烯的高电子迁移率使其在极低的电压下即可运作，这种特性可以用来制造高灵敏度的电磁场传感器。此外，石墨烯的机械强度和灵活性也允许其在不同的环境中保持稳定，增强了传感器的可靠性。

纳米材料，如纳米线和量子点，同样在提高天线传感器灵敏度方面发挥着重要作用。这些材料的小尺寸和高表面积对体积比提供了更多的表面活性位点，使得传感器对微小的化学或物理变化更为敏感。利用纳米技术可以制造出能够在分子水平上检测环境变化的超灵敏传感器。

Hong 等^[84]提出了一种使用银纳米线（AgNWs）来提高灵敏度的混合缝隙结构天线传感器，用于 THz 频段的微生物传感。研究者通过在槽型天线区域局部蚀刻 AgNWs，实现了在 AgNWs 尖端的场增强效果，通过实验验证引入 AgNWs 后传感器灵敏度显著提升，提升效果超过四倍。

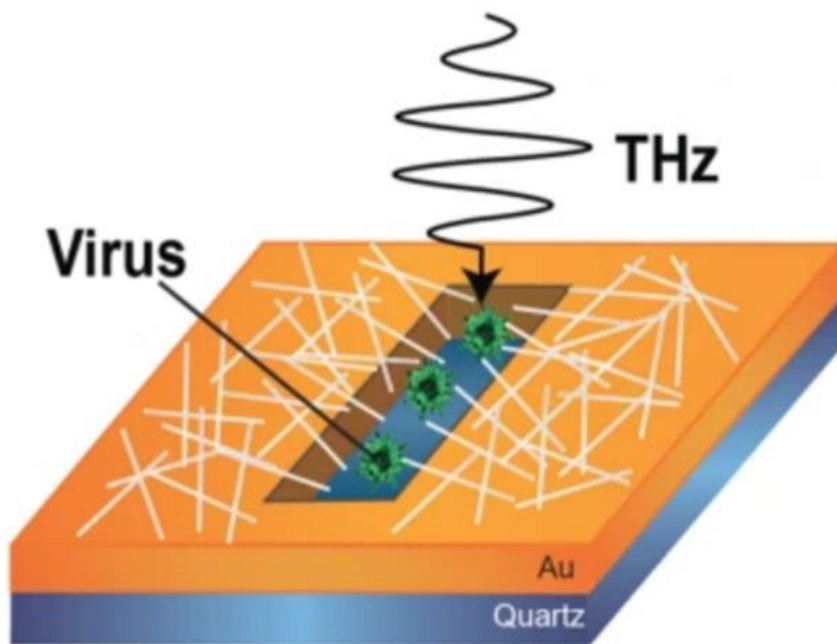


图 1.32 Hong 等提出使用 AgNWs 的 THz 混合缝隙天线传感器示意图^[84]

1.4.2 天线设计改进

在设计改进方面，多谐振设计是提升天线传感器灵敏度的有效策略之一。通过设计天线使其在多个谐振频率上工作，可以显著提升其对特定信号的捕获能力。例如，一个天线可以被设计为在不同的频段同时谐振，这样它就可以同时监测多个频率的信号变化，增加了使用的灵活性和应用的广泛性。

分形天线设计则利用了分形几何的自相似性和空间填充特性。分形结构可

以在多个尺度上重复，从而在不增加物理尺寸的前提下增加了天线的有效长度和表面积。这种设计不仅可以使天线在较宽的频率范围内工作，还可以改善其对信号的接收灵敏度和质量。

Yeo 等^[85]提出了一种使用辐射边缘槽加载的高灵敏度微带贴片传感器天线（MPSA）的设计方法，用于介电常数的测量。研究者在贴片的辐射边缘加载了一个类似于单环互补分裂环谐振器的弯曲槽，提升了传感灵敏度。通过实验及数据计算处理得出，所提出的弯曲槽加载 MPSA 的灵敏度比传统 MPSA 高 4.28 到 6.10 倍。

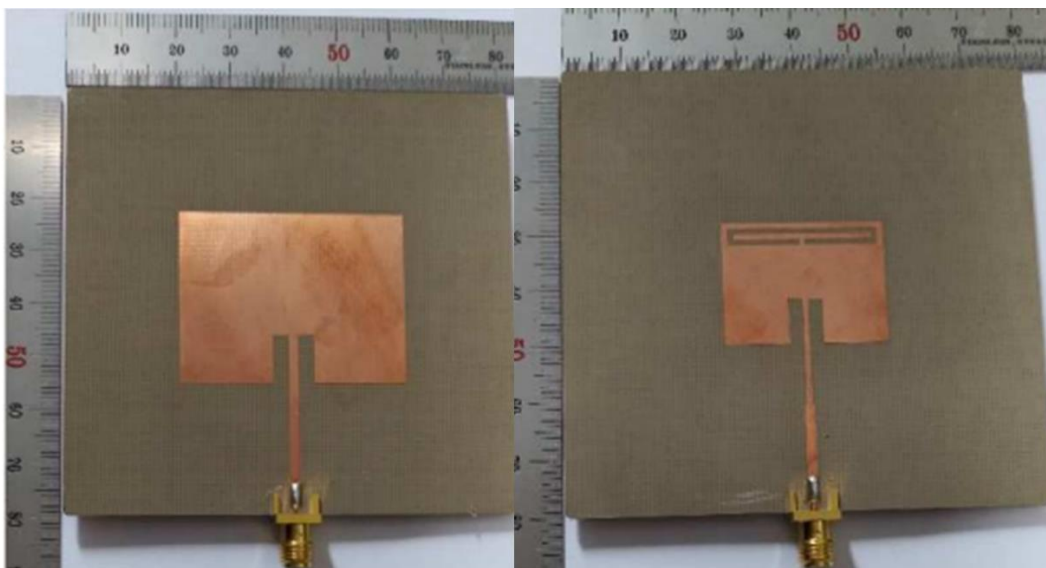


图 1.33 传统 MPSA（左）与 Yeo 等提出的弯曲草加载 MPSA（右）实物对比图^[85]

1.4.3 信号处理技术

先进的信号处理算法对于提高天线传感器的灵敏度至关重要。利用机器学习和数据融合技术，可以从收集到的大量数据中提取有价值的信息，即使在信号微弱或噪声条件下也能有效工作。例如，通过对天线接收到的信号进行复杂的算法处理，可以准确地区分背景噪声和目标信号，提高传感器的准确度和可靠性^[86]。

噪声抑制技术同样重要。在天线设计中采用特定的滤波技术和电路设计，可以有效减少电磁干扰和环境噪声的影响，提高信号到噪声比（SNR）。这对于提升传感器的响应灵敏度和减少误报率至关重要。

1.4.4 集成和系统优化

系统级集成设计是提高传感器灵敏度的一个重要方面。通过将天线与其他电子组件如放大器、AD 转换器和处理器紧密集成，可以减少信号在传输过程中

的损失，提高整体系统的性能。例如，集成设计可以在微芯片上同时布局天线和电子处理单元，这种近距离的物理布局有助于快速、准确地处理信号。

1.5 小型化天线研究概述

天线尺寸的小型化对现代通信技术具有极其重要的意义。小型化的天线可以更容易地集成到各种便携式设备如智能手机、平板电脑和可穿戴设备中，不仅满足了设备的便携性和集成性需求，同时也极大地提高了设备的美观度和用户体验。此外，小型天线的使用减少了所需材料，有助于降低制造成本，从而使得产品更具市场竞争力。随着消费电子产品向更小型、更高功能性的方向发展，天线小型化已成为无线通信领域研究的一大热点。

1.5.1 天线小型化主要方法

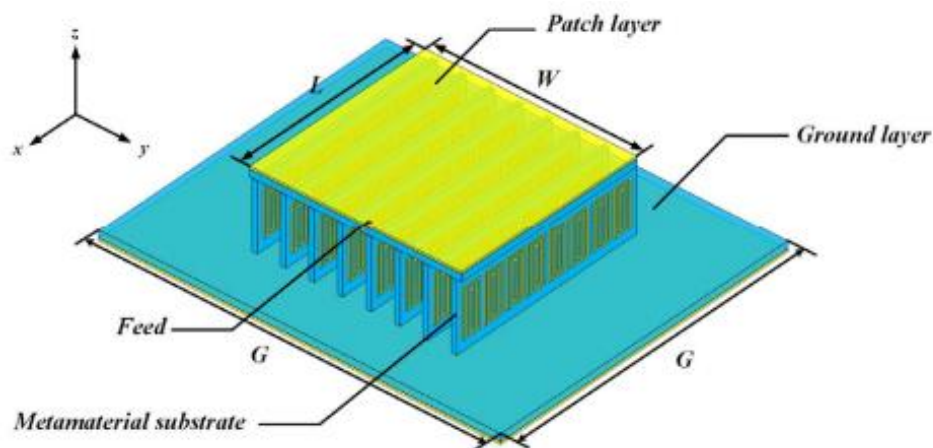
在实现天线小型化的过程中，设计师们采用了多种创新方法来保证天线在尺寸减小的同时，其通信性能不受影响。本小节介绍的几种小型化方法，是当前较为主流的方法，每一种都对天线的性能和功能性有着显著的提升作用。

1.5.1.1 结构设计优化

通过结构设计优化，可以有效地实现天线的小型化而不牺牲其性能。例如，利用分形设计可以创建多频带和宽带天线，这种设计允许天线在多个频段上工作，增强了其功能性，同时也可以显著减小天线尺寸。使用高介电常数材料是另一种有效的方法，这类材料可以缩短天线的谐振长度，从而减小天线的整体尺寸^[87]。此外，通过创新的形状设计，如采用环形、螺旋形或其他非传统形状，也能在保持良好性能的同时，实现天线的小型化。

1.5.1.2 技术创新

技术创新是推动天线小型化的另一个关键因素。微机电系统（MEMS）^[88]技术使得可以设计和制造可调节的微型天线，这些天线能够通过物理调整其结构以适应不同的操作频率，极大地增强了天线的灵活性和适用性。纳米技术的引入允许使用纳米级材料来制造极小的天线^[89]，这些材料不仅尺寸小，而且具有优异的电磁性能。此外，超材料的使用提供了设计新型天线的可能^[90]，这些材料的独特电磁特性如负折射率，可以用来开发具有异常电磁属性的超常规天线，进一步推进天线技术的边界。

图 1.34 Lu 等提出的螺旋超材料高频微带天线设计示意图^[91]

1.5.1.3 系统集成

系统集成也是实现天线小型化的有效途径。在设备设计初期将天线的集成考虑在内，可以更有效地利用设备内部空间^[92]。例如，将天线设计成手机外壳的一部分不仅节省了空间，还增强了天线的保护，减少了外部损伤的可能性。这种集成方法不仅优化了设备设计，还可能通过天线与其他电子组件的协同工作来提高整体设备性能。随着集成电路和微加工技术的发展，天线与设备的集成将越来越无缝，为未来通信技术带来新的创新潜力。



图 1.35 iPhone 14 手机外壳中的集成天线

本小节介绍的这些小型化方法展示了通过不同途径如何有效地实现天线的小型化，同时也突显了在设计小型天线时需要考虑的多方面因素。随着技术的不断进步，预计未来天线的小型化将继续是通信领域的一个重要研究方向。

1.5.2 天线小型化具体技术路径

基于天线小型化的方法，当前已有多种技术路径能够实现天线的高效紧凑的小型化设计。这些路径涵盖了分形天线、微带天线、介质谐振器天线、折叠和螺旋结构、共形天线、MEMS 技术、复合材料与新材料的应用以及多层和 3D 打印技术等。每种技术都有其独特的优势和适用场景，为现代无线通信和电子设备提供了多样化的解决方案。

1.5.2.1 分形天线

分形天线利用复杂的几何结构，如 Koch 曲线、Sierpinski 三角形等，实现高空间填充率和多频段操作。分形几何结构通过自相似性和多层迭代方式增加天线的电长度，尽管物理尺寸较小，仍能有效覆盖多个频段和宽频带范围。这种设计适合各种紧凑型设备，如智能手机、物联网设备和便携式电子设备。

1.5.2.2 微带天线

微带天线（patch antenna）是一种平面型天线，通常由金属贴片和介质基板构成。其主要优点是结构简单、制造成本低、易于集成在电路板上。微带天线的尺寸可以通过调节贴片的形状和尺寸来控制，同时使用高介电常数的基板材料可以进一步减小天线尺寸。这种天线广泛应用于卫星通信、无线局域网（WLAN）和移动通信系统中。

1.5.2.3 介质谐振器天线（DRA）

介质谐振器天线利用介质块作为辐射元件，通过介质材料的谐振来实现信号辐射。DRA 具有高介电常数，可以显著减小天线的尺寸，同时提供宽频带和高效率。DRA 天线的形状和尺寸可以灵活设计，以适应不同的应用需求，适用于高频和超高频（UHF）应用，如毫米波通信和雷达系统。

1.5.2.4 折叠盒螺旋结构天线

通过折叠和螺旋结构设计，可以在有限的空间内增加天线的电长度，从而实现小型化。例如，螺旋天线通过将天线导体绕成螺旋状，可以在较小的物理尺寸内实现较长的电长度和宽频带操作。折叠天线则通过将天线导体多次折叠，减小物理尺寸的同时增加电长度。这些结构适用于需要紧凑设计的无线通信设备和便携式电子设备。

1.5.2.5 共形天线

共形天线（conformal antenna）是指天线的形状与载体表面形状一致，可以安装在不规则或弯曲的表面上。这种设计不仅节省空间，还可以减小空气阻力和提高隐蔽性。共形天线通常用于飞机、导弹和无人机等平台上，能够在不影响平台外形和性能的情况下提供可靠的通信和导航功能。

1.5.2.6 基于 MEMS 技术的天线

微机电系统（MEMS）技术可以制造出极小的机械和电气元件，应用于天线设计可以实现天线的微型化。MEMS 天线通过微加工技术制造，具有高精度、小尺寸和低功耗的特点。它们广泛应用于移动通信、传感器网络和微型电子设备中，提供灵活的天线解决方案。

1.5.2.7 复合材料与新材料天线

使用新型材料和复合材料可以提高天线的性能和小型化程度。例如，使用高介电常数和磁导率的材料可以缩小天线的尺寸，同时保持良好的辐射特性。纳米材料和超材料（metamaterials）也在天线小型化中展现出巨大的潜力，通过操控电磁波的传播特性，实现超小型和高性能天线设计。

1.5.2.8 多层天线与 3D 打印技术

多层天线结构通过堆叠多个导电和介质层，实现天线的小型化和多功能化。3D 打印技术使得复杂天线结构的制造更加便捷和精准，可以实现更高效的空间利用率和定制化设计。这些技术在航空航天、国防和高端通信设备中得到了广泛应用。

1.5.3 天线小型化的限制与挑战

天线小型化虽然在现代通信设备中带来了许多益处，如设备的便携性、美观性和成本效益，但这一过程也伴随着一些技术挑战和性能上的代价。本小节将总结介绍天线小型化研究的一些局限性和可能带来的问题。

1.5.3.1 带宽限制

小型化天线通常面临的一个主要问题是带宽的限制^[93]。理论上，天线的尺寸与其操作波长相关联，尺寸缩小通常意味着天线的谐振频率提高，导致可用的带宽减少。这对于需要在宽频带上运作的应用（如宽带无线接入、多模式通信等）构成了限制。

1.5.3.2 效率降低

随着天线尺寸的减小，其辐射效率往往会受到影响^[94]。小型天线的辐射电阻减小，导致其辐射效率降低，这可能增加系统的功耗，影响信号的传输距离和质量。为了维持合理的效率，需要通过材料和设计上的创新来进行优化。

1.5.3.3 增益和方向性的牺牲

小型化天线的增益和方向性通常也会受到影响。较小的天线物理尺寸限制

了其电磁波的集中和方向控制能力，这可能导致信号覆盖范围和接收质量的下降。尤其是在需要高方向性的应用中，如定向通信和雷达系统，小型化天线的性能可能无法满足严格要求。

1.5.3.4 结构与材料的挑战

小型化天线设计要求更精细的结构和使用新型材料^[95]。这些高性能材料如石墨烯、纳米材料等虽然在实验中表现出色，但在实际应用中可能面临成本、制造复杂度和可靠性的挑战。此外，精密的微加工技术也需要更高的成本和更复杂的生产流程。

1.5.3.5 电磁干扰问题

随着天线尺寸的减小和设备内部集成度的提高，电磁干扰（EMI）成为一个越来越严重的问题。小型设备中天线彼此之间或其他电子组件之间的距离减小，可能导致相互干扰增加，影响天线的性能和设备的稳定性。

尽管存在这些挑战和局限性，研究人员和工程师仍在通过创新的设计方法、先进材料的使用和新技术的开发来克服这些问题，以实现天线技术的进一步小型化和性能优化。通过综合考虑设计、材料、制造和应用需求，未来的天线小型化研究有望突破现有限制，为通信技术的发展开辟新的可能性。

1.6 本文研究目的、意义及内容

1.6.1 研究目的及意义

结构健康检测领域中，由于监测对象涉及环境变化情况（如温度、湿度、酸碱度等）、结构的应力应变等力学特性和结构材料的状态等诸多微小、缓慢且存在复杂耦合效应的变化过程，因此，有关传感器的灵敏度提升研究对更精准、稳定且有效地监测这些变化具有重要的意义。而且由于如许多桥梁、隧道、高层建筑等许多关节结构的健康监测需要将传感器嵌入到结构内部形成长期监测网络，且翼梁、柱脚和桥墩等有限空间以及弯曲梁、异型钢结构等复杂结构对于传感器的布设位置及空间存在较为苛刻的要求，因此研究能够嵌入结构内部、不损伤结构且布设灵活的小型化传感器也具有重要意义。同时，如果一种传感器可以应用于监测多种不同的参数变化信息，甚至可以集成检测功能后同时稳定地监测多种参数并提供综合数据，则会带来经济效益的可观提升以及监测流程的简化，因此，研究如何拓展传感器的监测范围并集成传感器的监测功能也是十分有必要的。

由于具有低剖面、成本低廉、形状设计灵活、材料选择丰富等特点，贴片天线目前在天线传感器设计中成为了应用最广泛的天线种类之一。本文因此主要聚焦于贴片天线，通过对贴片天线的形状进行分形设计与多参数传感测试，在多种应用场景下对贴片天线传感器的小型化以及灵敏度提升提供了设计方案。本文从贴片天线的谐振频率影响因素出发，首先提出了一种应用分形设计实现贴片天线湿度传感器传感灵敏度增敏的设计方法。随后，探究了分形贴片天线湿度传感器的小型化设计原理及方法；最后，将该小型化增敏设计方法由单一湿度传感参数的应用拓展到了无应力式和空气间隙式两种原理不同的形变参数传感的天线传感器中，并探究了温度对分形贴片天线传感器的影响。

1.6.2 研究技术路线

本文主要采用理论推导、方案设计、仿真模拟、实验验证的技术路线，基于分形贴片天线的无源传感器增敏机制及小型化研究的具体研究路线如下：

（1）以实现增敏设计为目标，根据湿度传感模型提出增敏设计理论，提出一种分形贴片天线湿度传感器的增敏设计方法；基于 HFSS 电磁仿真软件对其传感灵敏度性能进行测试；委托厂商加工天线，采用矢量网络分析仪对传感器进行有线访问，设计水泥凝结时间监测实验测试验证其传感性能。

（2）以实现小型化设计为目标，提出小型化设计理论，提出湿度增敏与湿度退敏两种分形贴片天线湿度传感器的小型化设计方法；基于 HFSS 电磁仿真软件分别对其进行性能测试；委托厂商加工天线，采用矢量网络分析仪对天线进行有限访问，设计初始谐振频率测试实验与传感灵敏度测试实验验证其传感性能。

（3）基于两种传感原理不同的形变传感器，通过理论推导预测分形设计方法的可行性，在 HFSS 电磁仿真软件中对两种传感器的优化设计方法进行验证。

（4）基于贴片天线温度效应理论，预测分形贴片天线传感器的温度效应情况，在 HFSS 电磁仿真软件中对分形贴片天线进行模拟，并与矩形贴片天线进行比较，验证理论预测。

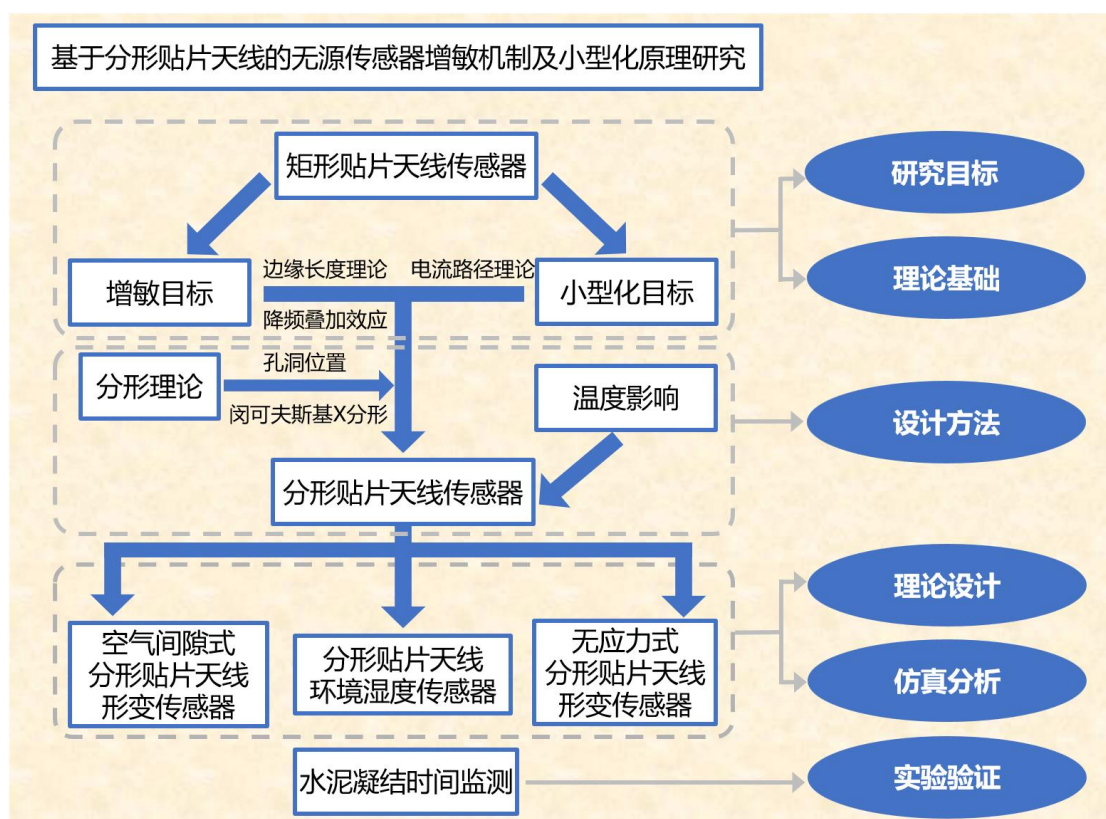


图 1.36 基于分形贴片天线的无源传感器增敏机制及小型化研究的研究路线图

1.6.3 主要研究内容

本文的主要研究内容及章节安排如下：

第一章为绪论。主要对分形天线以及天线传感器的小型化以及增敏方法的研究现状进行了介绍，表明了天线传感器小型化增敏研究的必要性，且体现了分形天线在天线传感器的小型化以及灵敏度提升方面有巨大应用潜力。

第二章为对贴片天线理论的介绍。本章以麦克斯韦方程组展开，对贴片天线的工作原理、电磁参数影响因素以及计算方法进行了说明。

第三章为分形贴片天线湿度传感器湿度增敏设计方法的理论推导、方案设计。本章主要对该设计方法的理论依据、设计细节、效果预测进行了阐述。

第四章为分形贴片天线传感器湿度增敏设计方法在水泥凝集时间监测应用中的理论推导、方案设计、仿真模拟验证和实验验证。本章主要对该应用过程的理论依据、设计细节、可行性验证进行了阐述。

第五章为湿度增敏与湿度退敏两种分形贴片天线传感器小型化设计方法的理论推导、方案设计、仿真模拟验证和实验验证。本章主要对两种小型化设计方法的理论依据、方法应用、可行性验证进行了阐述。

第六章为应用分形贴片天线优化设计方法的两种形变传感器的理论预测与

仿真模拟验证，本章主要拓展探究了分形贴片天线应用在两种形变传感器时，传感器谐振频率与传感灵敏度性能的变化，并在仿真模拟中验证了优化设计方案的合理性。

第七章为第三章提出的分形贴片天线进行温度影响测试的理论设计和模拟验证，本章主要探究了分形贴片天线谐振频率受温度变化的影响，并在仿真模拟中与优化设计前的矩形贴片天线对比，验证了分形设计方法的稳定性。

第八章为结论和展望。本章主要对之前的结论和成果进行了归纳总结，同时对后续研究的方向与内容进行了展望。

第2章 贴片天线的电磁参数和基本工作原理

天线传感器利用其电磁特性来表征结构中需要测量的参数。在当前的研究设计中，学者们期望天线的电磁特性与结构测量参数之间的关系更为简洁和明确，以降低使用天线传感器的成本。为了简化天线电磁特性与结构测量参数之间的关系，进行天线电磁特性的基础研究变得必要。特别是，考虑到谐振频率是本文研究的主要参数，本章基于麦克斯韦方程和腔模理论对贴片天线的谐振频率进行了理论推导，并探讨了影响其谐振频率的各种因素。

在第2.1节，介绍了电磁场与天线的基础理论，包括天线转换电流为电磁波的能力。

第2.2节介绍了贴片天线基本原理，利用腔模理论推导了贴片天线谐振频率的理论公式。

第2.3节系统性地总结了影响贴片天线谐振频率的因素及其影响程度，为后续的设计提供了指导。

2.1 电磁场和天线基本理论

天线本质上是一种导体，其功能是在空间电磁波信号与电路中电流信号之间进行互转，主要包括辐射和接收电磁波的功能^[96]。故在探究天线的属性前，了解电磁波的基础知识是必要的。本节先从电磁波的基础理论——麦克斯韦方程出发，进而分析并推导了天线在接收和发射电磁波方面的能力^{[97]-[99]}。

2.1.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组是描述电磁波的性质和行为的偏微分方程，由四个方程组成，其微分形式分别如下所示：

A. 法拉第电磁感应定律

法拉第电磁感应定律最初是用来描述法拉第磁生电试验现象而得出的试验规律，后来被证明并常被写作偏微分形式，如式2.1所示。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

其中， $\mathbf{E}$ 是电场强度， $\mathbf{B}$ 是产生电场的磁场的磁场强度， t 是时间。该方程表示，随时间变化的磁场可以产生随时间变化的对应的电场，并进一步证明产

生的电场强度旋度与在该时间点的磁场强度变化率的负值相等。

B. 全电流定律

与法拉第电磁感应定律相似，麦克斯韦从安培环路定理推广得到了全电流定律，全电流定律是描述交变电磁场中量的关系的一个函数关系，其偏微分方程形式如式 2.2 所示。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2.2)$$

其中， $\mathbf{H}$ 是磁场强度， $\mathbf{D}$ 是该磁场所代表的电磁波的电通密度， $\mathbf{J}$ 是电流密度， t 是时间。该方程表示，磁场可以被位移电流或传导电流生成，并进一步阐明磁场强度旋度矢量值与此刻电流的密度相等。

C. 高斯定律

高斯定律是描述在闭合曲面内，电荷电荷量和分布与电荷产生的电场之间的关系，其偏微分方程形式如式 2.3 所示。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

其中， $\mathbf{D}$ 是电通密度， ρ 是该电场的电荷密度。该方程表示，穿过任意封闭曲面的电通量只与该该封闭曲面内的电荷数目有关。且该电通量矢量和与该曲面内的电荷总电荷量与真空介电常数的商相等。由高斯定律可知，穿过不内含电荷的封闭曲面的电通量矢量和为 0。

D. 高斯磁定律

与高斯定律相对，高斯磁定律被用来描述在闭合曲面内的磁场分布状态，其偏微分方程形式如式 2.4 所示。

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \rho_m \quad (2.4)$$

其中， $\mathbf{B}$ 是磁感应强度， ρ_m 是该磁场的磁荷密度。该方程表示，穿过任意封闭曲面的磁通量与该封闭曲面内的磁荷密度有关。由于目前尚未发现磁单极子，因此，可推知穿过任意封闭曲面的磁通量矢量和为 0。

2.1.2 天线收发电磁波能力

麦克斯韦方程提供了一种观察电场和磁场相互作用的直观方式。通过天线这一媒介，电和磁能够互相转换，并遵循特定的规律。当天线中流通电流时，按照全电流定律，这种变化的电流将产生相应变化的电磁场并进行辐射；反之，当天线所在区域的电磁场发生变化时，根据法拉第的电磁感应定律，这一变化的电磁场会在天线这种导体中感应出电流。因此，天线作为一种导体，能够实现电流信号与电磁场感应信号之间的转换。

对于具体的收发能力评价，以简单的双导线天线为例，假定存在两根理想介质（不存在电传输损耗）的导体，其中导入了横向模的电磁波，如图 2.1 所示。

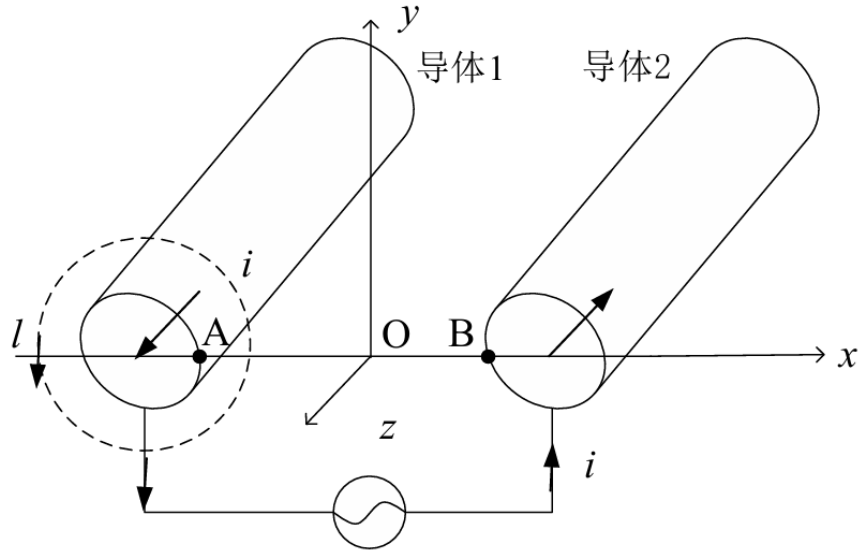


图 2.1 双导线天线示意图

在两根导线间取一路径 A-B，并对其进行电场积分，得到两点 U 。选择 A 点到 B 点的路径进行积分，得到两导线间的电压 U ：

$$U = U_{AB} = \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_A^B E_x dx \quad (2.5)$$

将电压对路径的法向求偏导，使用法拉第电磁感应定律分析可得：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \int_A^B \left(-\frac{\partial B_y}{\partial t}\right) dx = -\frac{\partial}{\partial t} \int_A^B B_y dx = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.6)$$

其中， $\int_A^B B_y dx$ 为路径 AB 的磁通量。进一步简化式 2.6，得到式 2.7：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial t} Li = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.7)$$

其中， L 为双导线天线单位长度上的电感分布， i 为路径的瞬时电流。该式表征了产生电场的瞬时电压与电磁场的瞬时电流间的关系。

由于在麦克斯韦方程组中，法拉第电磁感应定律与全电流定律互相对应，因此，类似的，适用全电流定律，对围绕导体的环路 l 进行计算，可得到式 2.8 和式 2.9：

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint_l (H_x dx + H_y dy) = i + \int_s \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial t} (CU) = -C \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2.9)$$

在公式中， C 表示的是双导线天线每单位长度的电容。这一公式也描述了

电场中瞬时电压与电磁场中瞬时电流之间的关系。考虑到天线的电容和电感对于特定的天线形状是已知的，通过结合公式 2.7 和 2.9，我们可以计算出电场中的电压。于是，双导线天线周围的电场可以通过天线中电磁波的导行波来描述。

然而，考虑到基于天线的传感器在实际应用中需要了解其谐振频率，理论上希望能够计算出天线的谐振频率。需要注意的是，天线的实际工作频率不能直接通过麦克斯韦方程简单计算，而是需要借助于各种模型和数值方法，如传输线模型、谐振腔模型和矩量法等来进行详细计算。传输线模型在计算基本谐振频率时效果较好，但对高阶谐振频率的计算不仅误差较大，也较为复杂；矩量法作为一种有限元方法，在计算时需消耗大量计算资源；与这些方法相比，谐振腔模型在计算精度和计算资源消耗上都更为优越，因此，在第 2.2 节中使用了谐振腔模型来分析贴片天线的谐振频率。

2.2 贴片天线基本原理

在探讨贴片天线的基本原理时，谐振腔假定扮演了关键的角色。谐振腔假定模型假设贴片天线为一个金属的封闭或者半封闭空腔，使电磁波在腔内在工作频率（谐振频率）来回震荡。通过模态分析，天线中各种电磁模态的分布和相应的谐振频率都可以被解析。本节将详细介绍这一理论以及矩形贴片天线的模态分析和谐振频率计算。

2.2.1 谐振腔基本理论

一个长、宽、高分别为 a, b, d 的基本的封闭矩形谐振腔如图 2.2 所示。

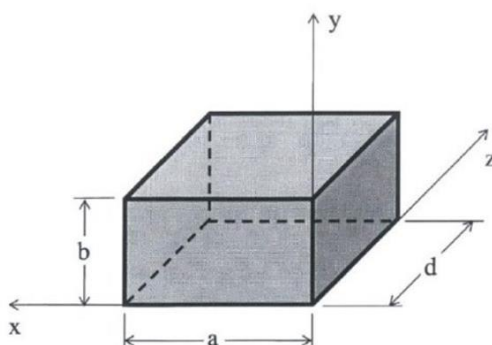


图 2.2 经典谐振腔示意图

该谐振腔具有对内部振荡的电磁波的基础筛选功能，筛选的到的电磁波具有特定的频率，这些频率被称为该谐振腔的谐振频率。下面分别对其电磁波传播方向的电场分量和谐振频率进行分析。

为简化计算，将高度 d 的方向选为电磁波的传播方向。假定谐振腔边界为理想磁壁，则如图 2.2 中的谐振腔在选择传播方向上，考虑谐振腔与波导的相似性，其电场分布 $E_z(x, y, z)$ 可以直接写出，如式 2.10 所示。

$$E_z(x, y, z) = \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)(C_1e^{-jk_zz} + C_2e^{+jk_zz}) \quad (2.10)$$

式中， m 、 n 分别为电磁波在长度方向和宽度方向的谐振阶数，为整数； C_1 、 C_2 为前向行波和反向行波的任意振幅。 k_z 为 m 、 n 谐振状态对应电磁波传播方向的传播常数，其可以用式 2.11 计算。

$$k_z = \frac{p\pi}{d} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (2.11)$$

其中， p 为电磁波在高度方向的谐振阶数，为整数。 k 可以采用下式计算：

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \quad (2.12)$$

其中， ω 是该电磁波圆频率， μ 、 ε 为谐振腔内部介质的磁导率和介电常数。由于该谐振腔为封闭谐振腔，在传播方向上下两个平面的边界条件可用式 2.13 和 2.14 确定。

$$E_z(x, y, 0) = E_y(x, y, 0) = 0 \quad (2.13)$$

$$E_z(x, y, d) = E_y(x, y, d) = 0 \quad (2.14)$$

将 2.13 与 2.14 中的边界条件代入式 2.10，可得：

$$-C_1 + C_2 = 0 \quad (2.15)$$

$$-C_1e^{-jk_zd} + C_2e^{+jk_zd} = 0 \quad (2.16)$$

联立式 2.15 与式 2.16，可得：

$$C_2 = C_1 \quad (2.17)$$

$$2jC_1\sin(k_zd) = 0 \quad (2.18)$$

将式 2.17、式 2.18 带回式 2.10，可以得到封闭矩形谐振腔在电磁波传播方向的电场分量：

$$E_z(x, y, z) = E_0\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\cos\left(\frac{p\pi}{d}z\right) \quad (2.19)$$

其中， E_0 为常数，其值等于 $2C_1$ 。由式 2.19 可知， m 、 n 不能为 0，否则谐振腔的电场分量将成为无意义的 0 值；因此，当电磁波沿高度方向传播时，主模在长度方向和宽度方向的谐振阶数不能为 0，而在高度方向上可以为 0。

引入谐振腔的谐振频率 f 与圆频率 ω 的关系：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.20)$$

联立式 2.11、式 2.12 与式 2.20，可以得到谐振腔谐振频率的计算公式 2.21：

$$f = \frac{k}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (2.21)$$

引入电磁波速度定义如式 2.22，公式 2.21 还可以进一步简化为式 2.23：

$$c = \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{\omega \varepsilon}} \quad (2.22)$$

$$f = \frac{k}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (2.23)$$

式中， ε_r 为谐振腔内部介质的相对介电常数。

2.2.2 基于谐振腔假定的贴片天线谐振频率计算

将如图 2.3 所示的矩形贴片天线与图 2.2 中的矩形谐振腔进行比较，可以发现，将贴片天线的上辐射贴片与底部接地平面视为谐振腔的上下壁时，矩形贴片天线近似等效为一个四周开路的谐振腔。因此，一旦证明谐振腔的四侧壁边界条件可近似视为理想磁壁，就可以应用矩形谐振腔的谐振频率计算公式来估算矩形贴片天线的谐振频率。

当贴片天线通过传输线接入电压时，电荷在电压作用下在上辐射贴片和接地平面的表面分布。同种电荷之间的斥力导致正负电荷在内部互相排斥，倾向于分布在贴片的上表面和下表面；而异种电荷之间的吸引力则使得上辐射贴片和接地平面上相对的面的电荷相互吸引。这些电荷分布趋势使得电荷主要沿贴片表面，从中心向边缘移动，从而在上辐射贴片和接地平面上感应出电流，并生成切向磁场。随着贴片天线高度的降低或宽度的增加，同一外加电压下，运动的电荷密度减小且距离缩短，导致感生电流减小。因此，当贴片天线的宽高比足够小，感生电流几乎可以忽略不计，此时贴片天线的边缘不存在切向磁场，可以视为理想磁壁。这样，就可以使用式 2.24 来计算谐振频率。

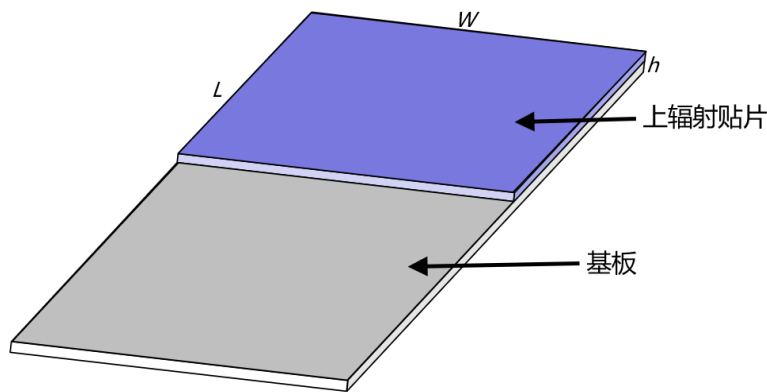


图 2.3 经典矩形贴片天线示意图

$$f = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2} \quad (2.24)$$

其中， L 、 W 、 h 分别为贴片天线上辐射贴片的长度、宽度和与接地平面的

距离， m 、 n 、 p 为在长度、宽度和高度三个方向的谐振阶数， ϵ_r 为贴片天线基板的相对介电常数。由于贴片天线的高远小于贴片天线的长和宽，高度方向谐振极其微弱，略去不计，此时，矩形贴片天线的谐振频率采用式 2.25 进行计算：

$$f_{mn} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2} \quad (2.25)$$

其中， f_{mn} 表示对应于贴片天线阶 TM_{mn} 谐振模态的谐振频率。需要注意的是，由于将天线四个侧壁的边界等效为磁壁，该式存在一定的近似。根据 Balanis 的研究，在满足式 2.26 时，该公式的计算结果可以视作足够精确。

$$10h < \min(L, W) \quad (2.26)$$

2.3 贴片天线谐振频率的影响因素

在天线设计中，将被监测结构的变量与贴片天线的电磁参数，例如谐振频率，有效地关联起来至关重要。因此，在具体的设计过程开始前，必须分析选定的天线电磁参数受哪些因素影响。

本节中，通过对影响机制的分类，识别出影响贴片天线谐振频率的主要因素是介质的介电常数和天线辐射贴片的长度。基于这些认识，本节进一步定性地分析了几种可能影响贴片天线谐振频率的因素。

2.3.1 基板相对介电常数

如式 2.25，贴片天线的谐振频率与其基板的相对介电常数有关。介电常数越大，贴片天线的谐振频率越小，因此，可以通过影响贴片天线的基板的有效介电常数，可以进一步影响天线的谐振频率。下面是贴片天线基板有效介电常数的几个影响因素。

A. 环境温度

绝大部分贴片天线的介质材料，如 Fr4，RT5880，RT5870 等，介质材料都会随环境温度的变化而产生细微的改变，当天线的设计谐振频率达到 GHz 数量级时，这种细微的改变就会达到可观测量级、导致不可忽视的变化。

B. 天线近场的电介质环境

环境中的非导电介质，如水（代表湿度）、封装塑料、以及机器外壳等，统称为环境电介质。虽然这些电介质不会影响天线基板的相对介电常数，但它们对天线的谐振频率的影响可以通过在基板的相对介电常数中添加一个修正系数来量化，因此这里也提及此事项。

贴片天线内部电场线的分布主要是从上辐射贴片下方直接投射到下方的接地平面，然而，也有部分电场线从上辐射贴片上方出发，穿过周围环境至天线的下接地平面下方。这些经过介质的磁感线引起的电效应可以通过调整基板介电常数来补正。当天线近场存在电介质时，经过这些介质的磁感线会发生偏移，这种偏移会改变用于修正基板介电常数的补正系数的数值，进而影响到贴片天线的谐振频率，一般而言，等效后的基板相对介电常数值介于基板原介电常数和电介质介电常数之间。

2.3.2 贴片天线上辐射贴片谐振方向长度

根据式 2.25，贴片天线的谐振频率与上辐射贴片在谐振方向的长度密切相关。当这一长度的变化较小时，其与谐振频率之间的关系可近似看作是线性的。由于这种关系比较简单，便于进行设计，因此这种方法在多种传感器设计中非常常见。接下来列出了一些常见的因素，这些因素会影响贴片天线上辐射贴片在谐振方向的长度。

A. 环境温度

环境温度的变化引起的热膨胀会导致上辐射贴片的尺寸发生变化，进而影响贴片天线的谐振频率。因此，在贴片天线传感器的实际使用中，对于环境温度变化带来的影响需要进行适当的校正。由于贴片天线的谐振频率受到辐射贴片长度和基板介电常数的共同影响，在校正过程中，为了提高精度，至少需要两种测量指标来对温度效应进行分离。

B. 天线尺寸

将贴片天线进行拉伸或压缩，可以有效地调整上辐射贴片的尺寸，这样直接影响天线的谐振频率。因此，将贴片天线直接贴合在结构表面，作为传感器使用，是一个非常便捷的设计选择。

C. 天线短接单元位置

连接金属板至天线的上辐射贴片可以增加其有效长度，进而调整天线的谐振频率。重要的是，根据公式 2.25，这种短接方式只会使上辐射贴片的有效长度增加，从而导致天线的谐振频率降低。

D. 天线耦合单元位置

在贴片天线的近场区域，非短接的金属物体可能与天线产生耦合，导致天线的谐振频率出现偏移。虽然严格来说，耦合单元对谐振频率的影响不是通过改变上辐射贴片的实际长度来实现的，但通过引入等效系数来修正上辐射贴片

长度的方式，也在此进行了说明。

存在耦合单元时，这种影响可被视为在天线中引入了容性或感性负载。因为贴片天线的电容和电感都与上辐射贴片的尺寸相关，所以当添加容性或感性负载后，这些负载单元可以直接并入上辐射贴片中，以此量化它们的影响。

在实际的设计工作中，天线的谐振频率通常受到多种因素的影响。例如，在设计用于应变检测的整体式贴片天线传感器时，主要影响因素是应变导致的天线上辐射贴片长度的变化，而次要因素包括环境温度、湿度以及周围的电介质环境等。在这种情况下，设计时需进行适当的补正，并可能需要采用多参数方法来解耦多种影响因素，确保天线传感器测量的准确性。

2.4 本章小结

本章主要对贴片天线的部分基础理论进行了较为详细的介绍，包络：

（1）本章首先详细介绍了电磁学的核心基础，即麦克斯韦方程，并在此基础上推导了传输线的基本方程。这部分内容阐明了天线在转换电信号与电磁波之间功能的基本机制。

（2）进一步，本章探讨了谐振腔模型，并应用此模型对矩形贴片天线的谐振频率进行了计算。通过谐振腔假定，本节提供了如何精确计算贴片天线谐振频率的方法论。

（3）本章最后对贴片天线谐振频率的影响因素进行了系统的分类和详细说明。这一部分旨在指导天线的选择和传感器设计，帮助设计者理解不同因素如何影响天线性能并据此进行优化。

第3章 分形贴片天线湿度传感器增敏机制研究

贴片天线的谐振频率会受到其上覆介质介电常数变化的影响，且上覆介质的介电常数与环境湿度直接相关。基于该性质，贴片天线可以作为湿度传感器监测环境湿度。

本章在矩形贴片天线环境湿度传感器的基础上提出了一种分形贴片天线设计方法，该设计方法可以实现贴片天线湿度传感器湿度传感灵敏度的提升。

在3.1节中，介绍了贴片天线湿度传感器的传感原理，并基于此提出了贴片天线的边缘长度理论，进一步阐述了湿度传感灵敏度增敏机制，并根据增敏机制在闵可夫斯基 X 分形的基础上进一步提出了一种形状复杂程度更高、边缘长度更大的类闵可夫斯基 X 分形模式，计划应用于贴片天线的增敏设计。

在3.2节中，根据3.1中的增敏机制，通过在矩形贴片天线上挖去类闵可夫斯基 X 分形形状的孔洞，提出了一种分形贴片天线湿度传感器的增敏设计方案，确定了三个分形阶数依次增加的分形贴片天线与用于对照的原矩形贴片天线的具体设计材料及尺寸，并根据3.1节中的理论做出了天线传感器传感灵敏度与其分形阶数相关关系的预测。

3.1 传感器设计原理

3.1.1 贴片天线湿度传感器传感原理

贴片天线传感器可以通过自身电磁参数对周围介质的平均介电常数进行表征^[100]。在具体测试过程中，贴片天线可以通过接收平面波入射和发射背向散射波进行信息传递，达到无源无线访问的目的。在早期研究中，为对传感器的性能进行较为精确的研究，往往添加匹配线，采用有线馈入电磁波模仿电磁波在有限空间中传播的方式^{[101]-[102]}，如图3.1所示。

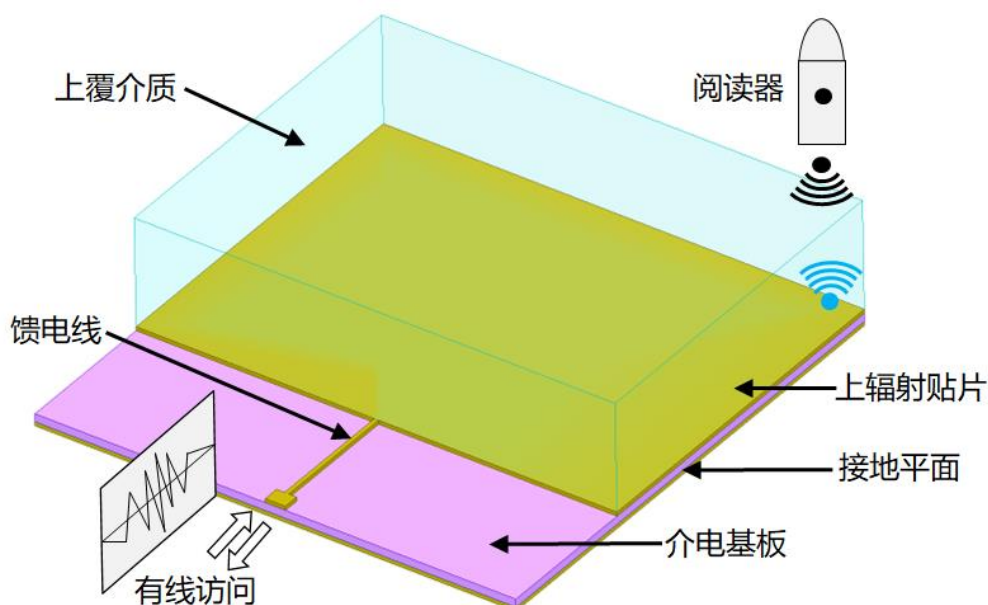


图 3.1 矩形贴片天线湿度传感器传感模型示意图

天线的谐振频率、带宽和回波损耗均可表征天线周围环境的介电常数^[31]。本章所提出的贴片天线湿度传感器是选用谐振频率来表征贴片天线上覆介质的含水量。这种表征方法的基本原理是当上传感器上覆介质的含水量发生变化时，上覆介质的介电常数会由此发生变化，而在该传感模型中，上覆介质的介电常数也是贴片天线谐振频率的决定因素之一，故谐振频率也会随着上覆介质含水量的变化而发生变化，由此实现湿度传感功能。

本小节将详细介绍矩形贴片天线湿度传感器的传感模型与传感原理，并推导相关物理量的具体理论计算公式。

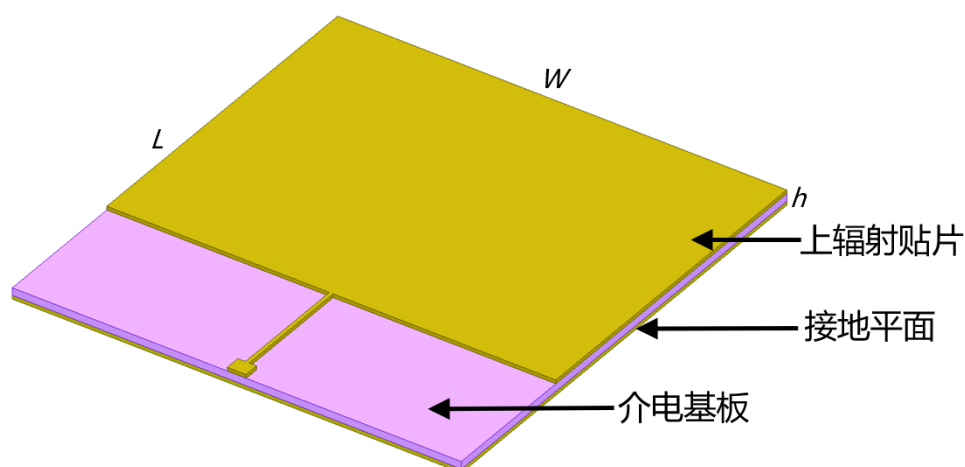


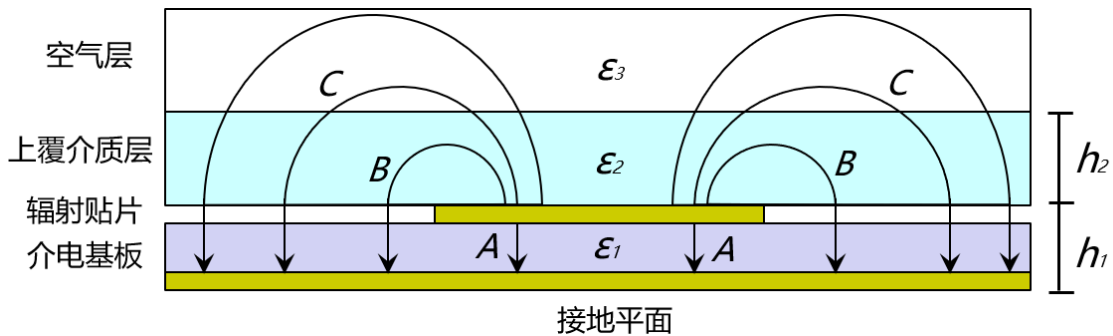
图 3.2 无上覆介质的矩形贴片天线模型示意图

如图 3.2 所示，在无上覆介质时，矩形贴片天线谐振频率可用式 3.1 计算。

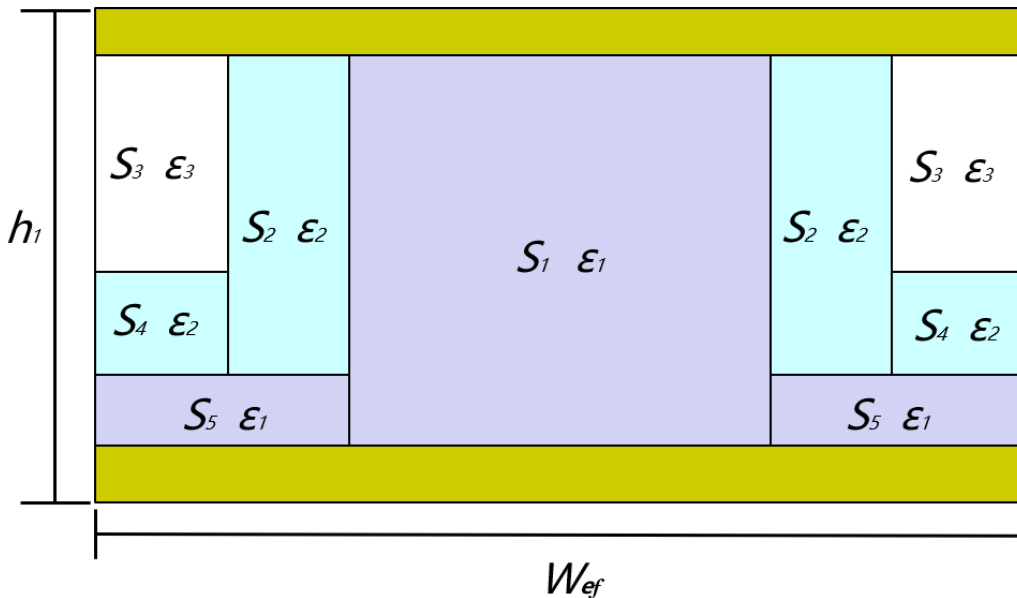
$$f_0 \approx \frac{c}{2L_r\sqrt{\epsilon_1}} \quad (3.1)$$

其中, c 是真空中光速, ϵ_1 是介质板的相对介电常数, L_r 是辐射贴片长度。

上覆介质介电常数主要通过边缘效应影响下部贴片天线的谐振频率。如图 3.3a 所示, 假定基板介电常数为 ϵ_1 , 厚度 h_1 , 上覆介电常数 ϵ_2 、厚度 h_2 的介质层, 介质层外为介电常数为 ϵ_3 的无限空气层, 则从上基板出发, 至下基板为止的电通共有 A、B、C 三种可能路径: 路径 A 为从上贴片直接通过基板到达接地平面, 路径 B 为经过边缘、穿过上覆介质层后到达接地平面, 路径 C 为经过边缘穿过上覆介质后、穿出介质进入无限空气层并返回接地平面。



(a) 矩形贴片天线湿度传感模型电场线分布示意图 (主视方向剖面)



(b) 矩形贴片天线湿度传感器基板相对介电常数等效计算模型示意图 (俯视方向)

图 3.3 近场电介质分布对矩形贴片天线谐振频率的影响示意图

通过电通路径等效, 可以将环境对天线电磁效应的影响等效为基板介电常数部分区域的变化, 也即, 可以将电场线经行区段分类对上覆介质的边缘效应

进行评估，将上覆介质影响通过等效介电常数进行表征，如图 3.3b 所示。

此时，基于电容等效效应，基板的等效介电常数 ε_e 与上覆介质介电常数和高度的关系可用式 3.2 进行描述。

$$\varepsilon_e = \varepsilon_1 q_{1n} + \frac{\varepsilon_1(1-q_{1n})^2 \times [\varepsilon_2^2 q_{2n} q_3 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 (q_{2n} q_4 + (q_3 + q_4)^2)]}{\varepsilon_2^2 q_{2n} q_3 q_4 + \varepsilon_1 (\varepsilon_2 q_3 + \varepsilon_3 q_4) (1-q_{1n}-q_4)^2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 q_4 [q_{2n} q_4 + (q_3 + q_4)^2]} \quad (3.2)$$

其中， q_{1n} 是基板的影响因数， q_{2n} 是介质层的影响因数， q_3 是无限空气层的影响因数， q_4 是基于极限状态下（无限空气层）的计算误差引入的修正因数。

将式 3.2 带入式 3.1，可知在上覆介质形状与体积固定不变的情况下，矩形贴片天线谐振频率与上覆介质介电常数的关系，如式 3.3 所示。

$$f_0 \approx \frac{c}{2L_r \sqrt{\varepsilon_e}} \quad (3.3)$$

3.1.2 边缘长度理论与湿度灵敏度增敏机制

对于本章所讨论的贴片天线湿度传感器，根据 3.1.1 中该传感器的传感原理模型可知，该传感器在具体应用中存在提升传感灵敏度的设计需求。实际上，根据图 3.3 与式 3.2 可知，上覆介质的湿度发生变化时，上覆介质层的介电常数 ε_2 变化从而导致基板等效介电常数 ε_e 发生变化，由式 3.3 可知，最终会引起矩形贴片天线谐振频率 f 的变化，从而实现谐振频率表征上覆介质湿度的传感过程。

传感灵敏度的提升本质上是增强这一表征过程中湿度变化对谐振频率变化的影响。

由于上覆介质的湿度与上覆介质介电常数 ε_2 直接相关且该过程没有任何人工干预，故无法在该传感模型下中放大湿度变化对上覆介质介电常数 ε_2 影响带来的变化。

但在基板等效介电常数 ε_e 表征天线谐振频率 f 的变化这一过程理论上是通过图 3.3b 的影响模型实现的，且由式 3.2 可知，上覆介质介电常数 ε_2 是决定基板等效介电常数 ε_e 的一个关键参数。

因此只要在式 3.2 中相对于其他影响因数，增大上覆介质层影响因数 q_{2n} ，即可放大上覆介质介电常数 ε_2 对基板等效介电常数 ε_e 。从而由式 3.3 的关系将放大效应传递给天线的谐振频率，由此实现传感器传感灵敏度的提升。

本节将详细介绍贴片天线湿度传感器的边缘长度理论以及其湿度灵敏度增敏机制。

3.1.2.1 边缘长度理论

在 3.1.1 所提出的贴片天线湿度传感模型的三种电通路径中，穿过上覆介质的电场线主要集中在贴片天线的边缘部分，而在贴片材料连续的中间部分，电

场线则基本都是直接从上贴片通过基板到达接地平面，并没有穿过上覆介质。而穿过上覆介质的电场线越多，上覆介质介电常数 ε_2 对基板等效介电常数 ε_e 的影响越大，传感灵敏度也将升高。

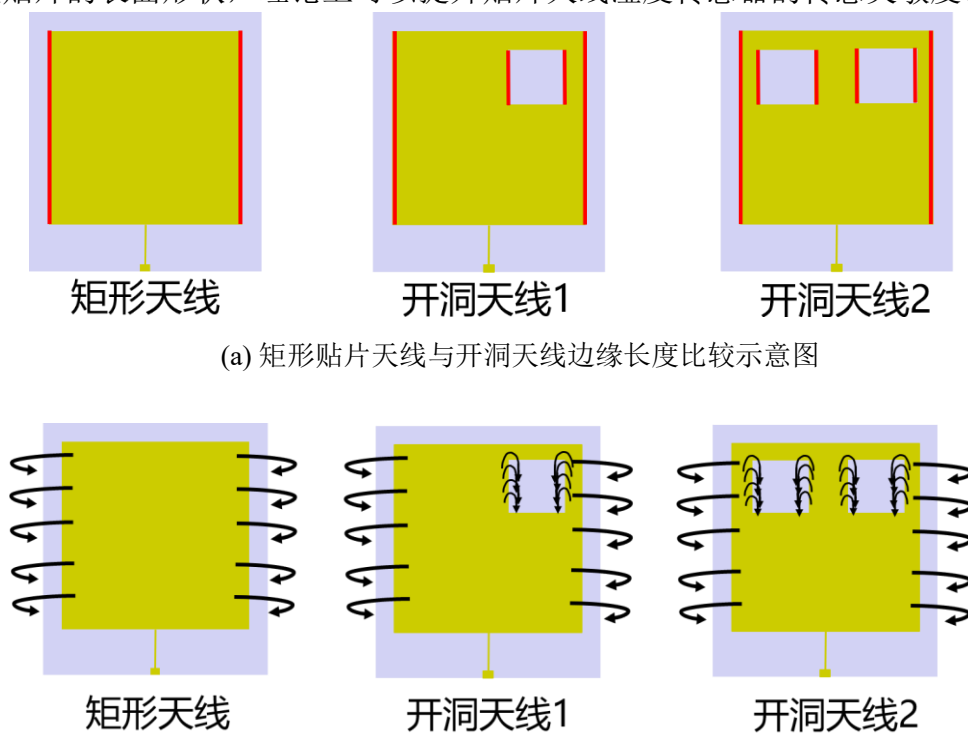
由此提出基于贴片天线湿度传感模型的边缘长度理论：根据贴片天线辐射模型的电场线分布规则，贴片天线表面沿电流方向的边缘部分越多，即贴片天线的边缘长度越大，穿过上覆介质的电场线越多，贴片天线对上覆介质介电常数 ε_2 的传感灵敏度越高，即湿度感知灵敏度越高。

边缘长度理论的具体数学表达式如式 3.4 所示。

$$S \propto C \quad (3.4)$$

其中， S 为贴片天线传感器的湿度感知灵敏度， C 为矩形贴片的边缘长度。

根据边缘长度理论可知，开洞、切割边缘等改变矩形贴片表面形状的方法均可以增加贴片天线的边缘长度。如图 3.4 所示，矩形贴片上红色部分表示的边缘长度在开洞后显著增加，穿过上覆介质的电场线也明显增多。因此，合理地改变贴片的表面形状，理论上可以提升贴片天线湿度传感器的传感灵敏度。



(b) 矩形贴片天线与开洞天线边缘部分电场线分布比较示意图

图 3.4 矩形贴片天线边缘长度理论等效示意图

3.1.2.2 湿度传感灵敏度增敏机制

根据边缘长度理论，可知增大矩形贴片的边缘长度即可提升贴片天线传感器的湿度感知灵敏度。本小节将根据这一原理对矩形贴片天线传感器的湿度增

敏机制做出详细的理论解释与过程推导。

由于边缘长度的增加是表面贴片形状变化而造成的，而表面贴片形状的变化同时也会使式 3.3 中贴片天线的有效长度的 L_r 发生变化， L_r 的变化也会使天线的谐振频率发生变化，但是这种变化已经验证只与贴片天线的小型化有关，不会对贴片天线的湿度传感灵敏度造成影响，故在第五章中集中讨论有效长度变化与贴片天线小型化的关系，在本章只讨论表面形状变化对 ε_e 以及贴片天线湿度传感灵敏度的影响。

由 3.1.1 中的传感原理可知，对于一个典型的矩形贴片天线湿度传感器，其基板的等效介电常数 ε_e 可以通过式 3.2 计算得出：

$$\varepsilon_e = \varepsilon_1 q_{1n} + \frac{\varepsilon_1(1-q_{1n})^2 \times [\varepsilon_2^2 q_{2n} q_3 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 (q_{2n} q_4 + (q_3 + q_4)^2)]}{\varepsilon_2^2 q_{2n} q_3 q_4 + \varepsilon_1 (\varepsilon_2 q_3 + \varepsilon_3 q_4) (1-q_{1n}-q_4)^2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 q_4 [q_{2n} q_4 + (q_3 + q_4)^2]} \quad (3.2)$$

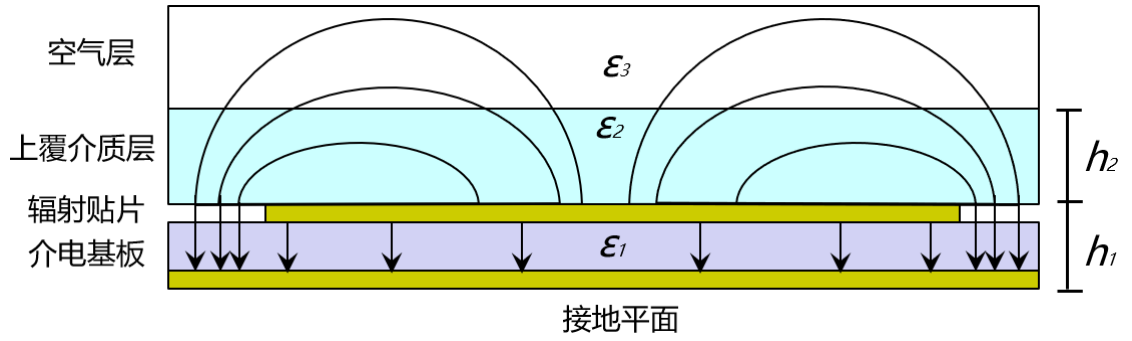
其中， q_{1n} 是基板的影响因数， q_{2n} 是介质层的影响因数， q_3 是无限空气层的影响因数， q_4 是基于极限状态下（无限空气层）的计算误差引入的修正因数。这些影响因数具体的取值由图 3.3b 所示的等效模型计算确定。

在 3.3b 所示的等效模型中，通过将电场线经行区段做出定量划分，可以得出介电基板影响部分的区段系数 S_1 和 S_5 、上覆介质层影响部分的区段系数 S_2 和 S_4 以及空气层影响部分的区段系数 S_3 。这些区段系数的具体值会直接决定式 3.2 中的各部分的影响因数 q_{1n} 、 q_{2n} 、 q_3 以及 q_4 的具体值。

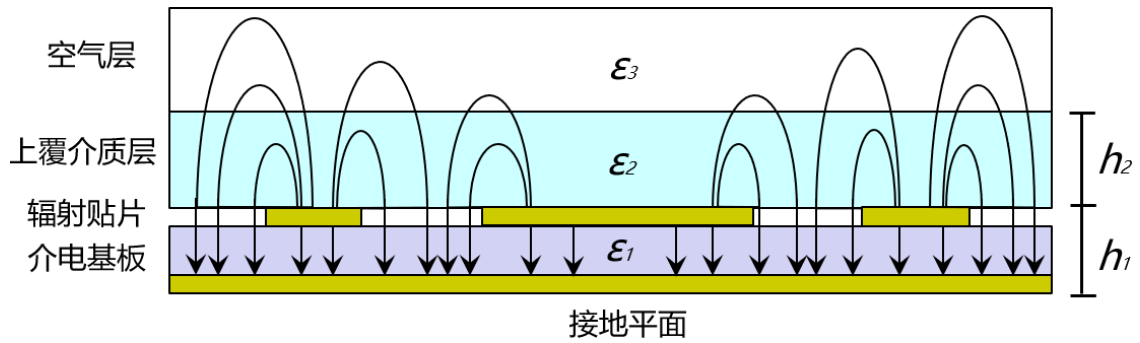
典型的矩形贴片天线湿度传感器的矩形贴片的边缘长度为其周长 C ，当对矩形贴片的表面形状做出适当修改（开洞或对边缘部分进行切割）后，矩形贴片的边缘长度会增加 ΔC （ $\Delta C > 0$ ），修改表面形状后的矩形贴片的边缘长度 C' 如下式 3.5 所示。

$$C' = C + \Delta C \quad (\Delta C > 0) \quad (3.5)$$

对于边缘长度为 C 和 C' 的矩形贴片天线湿度传感器，其工作时电场线的分布情况是不同的。如对比图 3.5a 所示的一个典型的矩形贴片天线湿度传感器和图 3.5b 所示的一个开洞矩形贴片天线湿度传感器可知，矩形贴片的边缘长度增加后，在辐射贴片边缘处较多的穿过上覆介质层的电场线数量也明显增加。



(a) 一个典型的矩形贴片天线湿度传感器工作时的电场线分布示意图（主视方向剖面）



(b) 一个开洞的矩形贴片天线湿度传感器工作时的电场线分布示意图（主视方向剖面）

图 3.5 矩形贴片天线湿度传感模型边缘长度增加前后电场线分布示意图

当矩形贴片的表面形状改变后，贴片天线工作时穿过上覆介质层的电场线数量增多，因此，图 3.3 中的等效计算模型不再适用。由于上覆介质层的影响增加，而天线基板与空气层的影响相对减弱，需要对形状改变后的矩形贴片天线湿度传感器的等效介电常数计算模型做出修正，模型修正方向如图 3.6 所示。

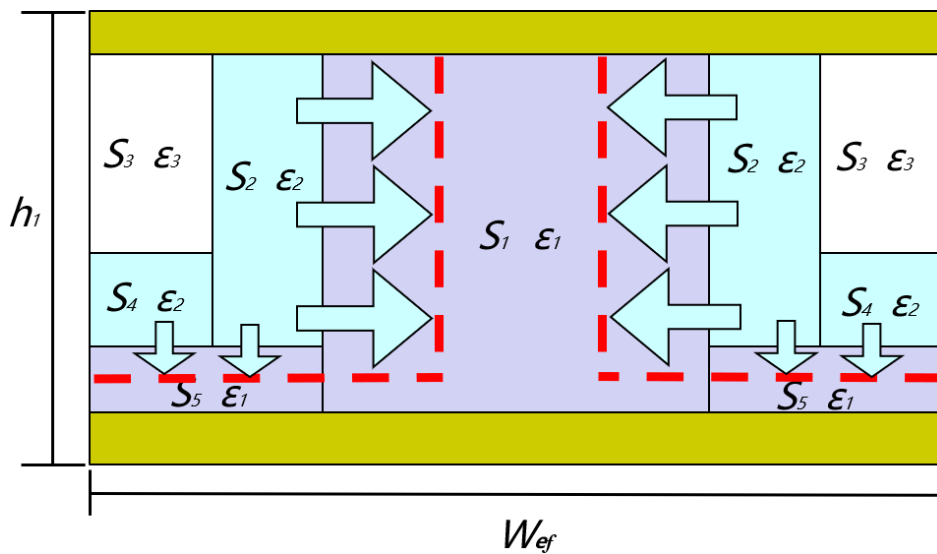


图 3.6 边缘长度增加后基板相对介电常数等效计算模型变化示意图（俯视方向）

由图 3.6 可知, 增加矩形贴片的边缘长度之后, 原等效计算模型中的介电基板影响部分的区段系数 S_1 和 S_5 会相对原值减小, 上覆介质层影响部分的区段系数 S_2 和 S_4 则会增大。由于这些区段系数的具体值会直接决定式 3.2 中的各部分的影响因数 q_{1n} 、 q_{2n} 、 q_3 以及 q_4 的具体值, 且它们的关系如式 3.6 至式 3.9 所示。

$$S_1 \propto q_{1n} \quad (3.6)$$

$$S_5 \propto q_{1n} \quad (3.7)$$

$$S_2 \propto q_{2n} \quad (3.8)$$

$$S_4 \propto q_{2n} \quad (3.9)$$

则对于边缘长度增加后的天线传感器, 其基板等效介电常数 ε'_e 的具体计算公式由式 3.10 可以得出:

$$\varepsilon'_e = \varepsilon_1 q'_{1n} + \frac{\varepsilon_1(1-q'_{1n})^2 \times [\varepsilon_2^2 q'_{2n} q_3 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 (q'_{2n} q_4 + (q_3 + q_4)^2)]}{\varepsilon_2^2 q'_{2n} q_3 q_4 + \varepsilon_1(\varepsilon_2 q_3 + \varepsilon_3 q_4)(1-q'_{1n} - q_4)^2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 q_4 [q'_{2n} q_4 + (q_3 + q_4)^2]} \quad (3.10)$$

其中, 相比于原式 3.2, q'_{1n} 是修正后基板的影响因数, q'_{2n} 是修正后的介质层的影响因数, 且他们与修正前的 q_{1n} 、 q_{2n} 存在如下式 3.11 和式 3.12 的关系。

$$q'_{1n} < q_{1n} \quad (3.11)$$

$$q'_{2n} > q_{2n} \quad (3.12)$$

故对于边缘长度增加后的天线传感器, 其谐振频率 f'_0 与基板等效介电常数 ε'_e 的关系如式 3.13 所示。

$$f'_0 \approx \frac{c}{2Lr\sqrt{\varepsilon'_e}} \quad (3.13)$$

对于原矩形贴片天线传感器与边缘长度增加后的贴片天线传感器, 上覆介质介电常数 ε_2 发生相同变化量 $\Delta\varepsilon_2$ 时, 由式 3.2 与式 3.10 可知, 原矩形贴片天线传感器与边缘长度增加后的贴片天线传感器各自的基板等效介电常数 ε_e 与 ε'_e 的增量 $\Delta\varepsilon_e$ 与 $\Delta\varepsilon'_e$ 的关系如下式 3.14 所示。

$$\Delta\varepsilon_e < \Delta\varepsilon'_e \quad (3.14)$$

则将式 3.19 的关系代入式 3.3 与 3.18 可得到原矩形贴片天线传感器与边缘长度增加后的贴片天线传感器在上覆介质介电常数同时变化 $\Delta\varepsilon_2$ 时, 各自的用于湿度传感表征的谐振频率变化量之间的关系如下式 3.15 所示。

$$\Delta f_0 < \Delta f'_0 \quad (3.15)$$

因此, 可得出两种天线传感器的湿度感知灵敏度 S 与 S' 的关系如式 3.16 所示。

$$S < S' \quad (3.16)$$

故由以上理论推导过程可以验证, 相比于原有的矩形贴片天线传感器, 修改辐射贴片的表面形状(即边缘长度增加)之后的贴片天线湿度传感器, 对于同一种上覆介质等量的介电常数变化量, 其谐振频率的变化量更大, 即湿度感知灵敏度更高。因此, 根据边缘长度理论以及上述推导过程, 湿度灵敏度增敏

机制得以解释验证。

3.1.3 一种类闵可夫斯基 X 分形的迭代与生成方法

闵可夫斯基分形，以其数学精确性和结构复杂性而著称，起源于赫尔曼·闵可夫斯基的工作。这种分形通过简单的迭代过程从基本的几何形状如正方形或立方体生成更复杂的图形。在每次迭代中，特定的部分被细分并部分移除，从而逐步展现出其独特的自相似性和复杂边界。本小节将介绍闵可夫斯基分形中的 X 分形模式^[103]，并在此基础上提出一种边界复杂程度更高的类闵可夫斯基 X 分形模式，为后续矩形贴片天线的小型化增敏设计方案提供基础。

3.1.3.1 闵可夫斯基 X 分形

闵可夫斯基 X 分形也被称为闵可夫斯基十字或减去形闵可夫斯基矩形分形，因为它涉及到从原始的正方形中去除部分小正方形的步骤。闵可夫斯基 X 分形的具体迭代和生成过程如图 3.7 所示。

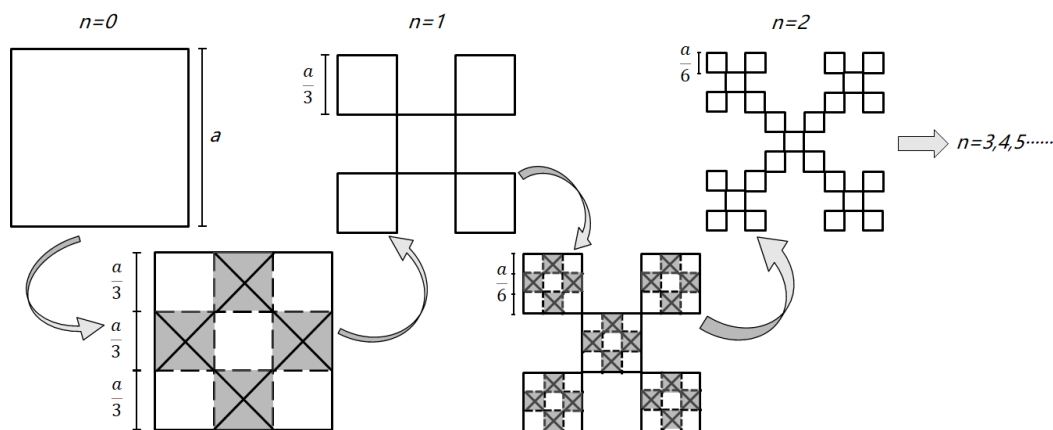


图 3.7 闵可夫斯基 X 分形模式迭代过程示意图

对于闵可夫斯基 X 分形，由于每次迭代后，图形中每条边的段数都会增加到前一次的 4 倍，边长则缩小为前一次的三分之一。因此，对于图 3.7 中初始边长为 a 的闵可夫斯基 X 分形，每次迭代后其周长的通项公式如式 3.17 所示。

$$C_n = \frac{4^{n+1}}{3^n} a \quad (3.17)$$

式 3.22 表明随着迭代的增加，尽管每段边的长度在减小，但由于段数的增加，图形的总周长实际上是以一个固定的比率增加的。这也揭示了分形的一个关键特征：分形图案的周长会随着迭代次数的无限增加而无限增长，反映了其不断增加的复杂性和细节丰富度。

分形维数 D 作为一个测量分形复杂性和细节程度的指标，代表着分形图形在空间中填充的方式。分形维数的概念超越了传统的一维线段、二维平面和三

维体积的简单分类，为不规则且经常自相似的结构定量分析提供了方法。且分形维数越大，分形结构在每次迭代中添加的细节就越多，其在空间中的分布就越复杂。较高的分形维数通常也意味着分形的边缘或表面更加曲折，并且在视觉上显得更加“密集”。

对于闵可夫斯基 X 分形，其分形维数 D_x 可以由式 3.18 计算。

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln(S)} \quad (3.18)$$

其中， N 是每次迭代后形状的数量， S 是缩放因子（即每次迭代中形状的缩小比例）。

对于闵可夫斯基 X 分形，每次迭代后的有效正方形数量为上一次的 5 倍（因为初始正方形分为 9 个小正方形，但只保留了 5 个），因此 $N = 5$ 。而每个小正方形的边长缩小为原有的三分之一，故迭代的缩放因子 $S = 3$ 。

因此，将 $N = 5$ 与 $S = 3$ 代入式 3.24，可得闵可夫斯基 X 分形的分形维数 D_x 如下式 3.19 所示。

$$D_x = \frac{\ln 5}{\ln 3} = 1.465 \quad (3.19)$$

3.1.3.2 类闵可夫斯基 X 分形

为了提升分形图案边缘的复杂程度以及周长（边缘长度），在闵可夫斯基 X 分形的基础上，本小节提出了一种类闵可夫斯基 X 分形的全新分形模式，其具体迭代和生成过程如图 3.8 所示，其中每次迭代新产生的小正方形的中心正好与被迭代的原较大正方形的角点重合。

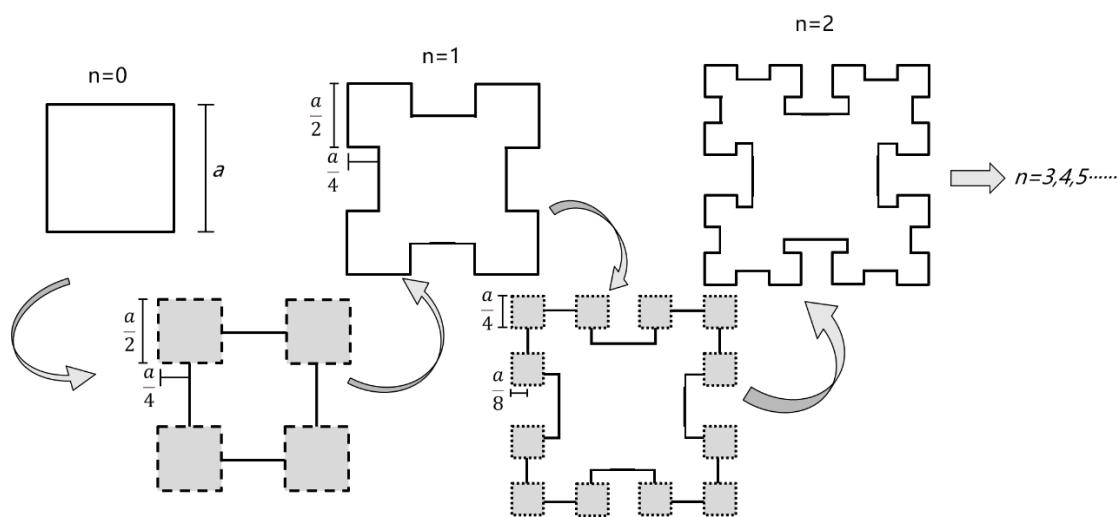


图 3.8 类闵可夫斯基 X 分形模式迭代过程示意图

对于这种类闵可夫斯基 X 分形，由于每次迭代后，图形中每个方向的边缘的长度都会变为原来的二分之三倍。因此，对于图 3.8 中初始边长为 a 的类闵可

夫斯基 X 分形，每次迭代后其周长的通项公式如式 3.20 所示。

$$C_n = \frac{3^n}{2^{n-2}} a \quad (3.20)$$

由式 3.20 可知，这种类闵可夫斯基分形模式的图形周长会随着迭代次数的无限增加而无限增长，符合分形的基本特征。

对于这种类闵可夫斯基 X 分形，其边长的缩放因子 $S = 2$ （新增矩形的边长为原矩形的二分之一），迭代后图形的数量 $N = 3$ ，故其分形维数 D'_x 可以由式 3.18 计算得出，如下式 3.21 所示。

$$D'_x = \frac{\ln 3}{\ln 2} = 1.585 \quad (3.21)$$

对比两种分形模式可知，新提出的类闵可夫斯基 X 分形模式比原有的闵可夫斯基 X 分形模式的分形维数更高，即复杂程度更高。且在相同迭代次数下，类闵可夫斯基 X 分形模式比原有的闵可夫斯基 X 分形模式的图案周长更长，即边缘长度更长。

3.2 传感器的选型与设计方案

为了实现矩形贴片天线传感器的小型化增敏设计的目标，本小节将根据 3.1 中的理论基础提出一种基于修改原有矩形贴片天线表面形状的拓扑优化方法，使得优化后所得的分形贴片天线传感器获得更高的湿度传感灵敏度。且该拓扑设计方法能根据分形天线中分形模式的分形阶数，即分形模式的迭代次数，实现灵敏度的可调节设计。同时，这一过程也能验证 3.1 中所提出的边缘长度理论。

3.2.1 选型与设计原则

一般情况下，在设计矩形贴片天线时，首先往往先根据其工作频段需求确定其谐振频率，其次根据实际的应用场景选择合适的基板材料（如温度不敏感或柔性需求），再次根据 3.1.1 中的式 3.1 来确定其上覆贴片的长度 L ，并选取使其具有较好的阻抗匹配和辐射特性的宽度 W （一般 W 取值为贴片天线工作波长的一半），最终确定其尺寸。

在本文中，由于分形贴片天线传感器表面带有形状复杂的分形结构，且该研究的主要目的是验证所提出的贴片天线传感器小型化增敏方法的可行性，该优化方法在得到验证后，可以适用于所有特定频率的贴片天线传感器。因此，在理论方法的验证过程中，应以能够完成且便利验证过程为原则进行分形贴片天线传感器的选型与设计，包括在能验证理论方法的前提下，形式简洁、便于

理论与仿真计算、便于实验加工、性能符合实验测试标准等。

根据边缘长度理论与分形理论，拟采用在矩形贴片天线辐射贴片表面挖去分形图案孔洞的方法来实现湿度增敏设计，同时随着分形图案分形阶数的提升，分形贴片天线的边缘长度会逐渐增加，传感灵敏度因此而提升，由此可实现灵敏度的可调节设计，如图 3.9 所示。

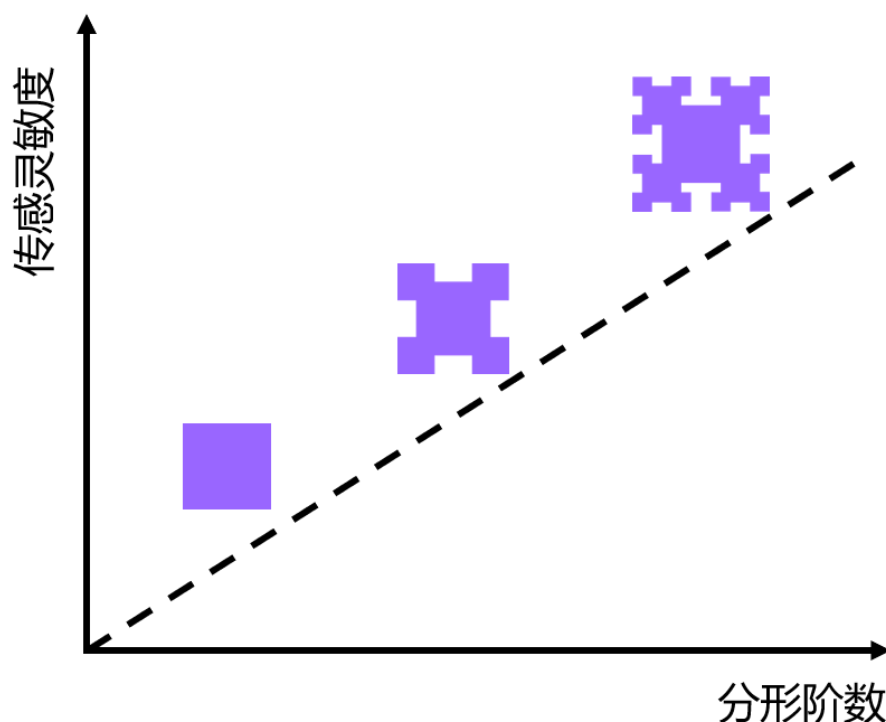


图 3.9 类闵可夫斯基 X 分形分形阶数与贴片天线传感灵敏度设计关系示意图

3.2.2 选型与设计方案

根据 3.1.1 中的设计原则，设计在仿真与实验中用于对照的矩形贴片天线如图 3.10 所示，该矩形贴片天线的具体尺寸信息如表 3.1 所示。由于专注湿度传感的需求，该矩形贴片天线选用温度不敏感的 RT5880 高频压合板（基板介电常数设为 2.2，且谐振频率随温度的变化而发生的变化十分微小），同时辐射贴片与接地平面都采用覆铜方式设计。图 3.10 中侧视图的覆铜为示意图，相比于基板的厚度，覆铜的实际厚度是十分微小的，约为 0.0175mm。在本章后续的仿真与实验中，都将采用该矩形贴片天线传感器作为初始对照组。

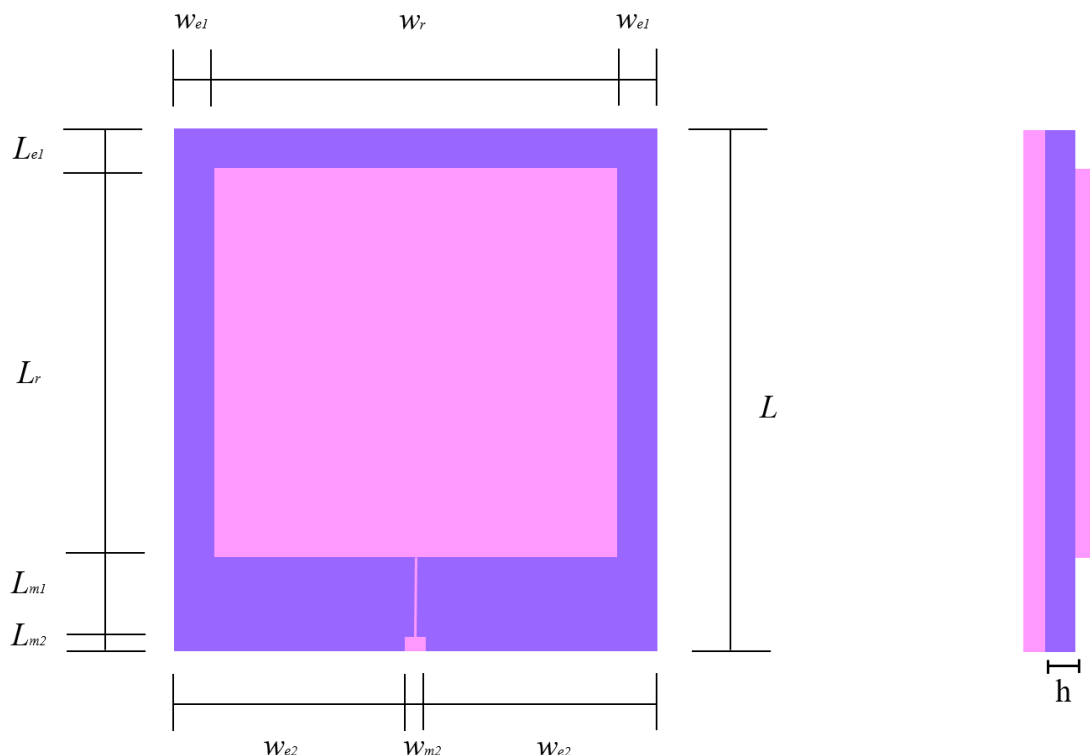


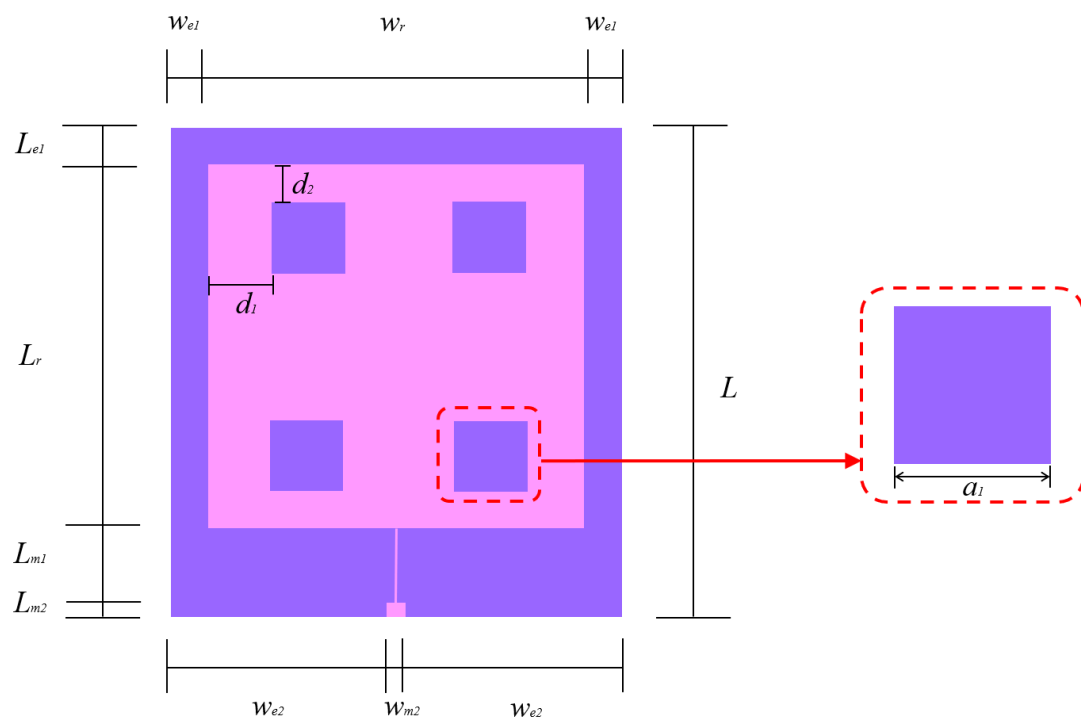
图 3.10 矩形贴片天线设计尺寸示意图

表 3.1 矩形贴片天线具体尺寸参数信息表

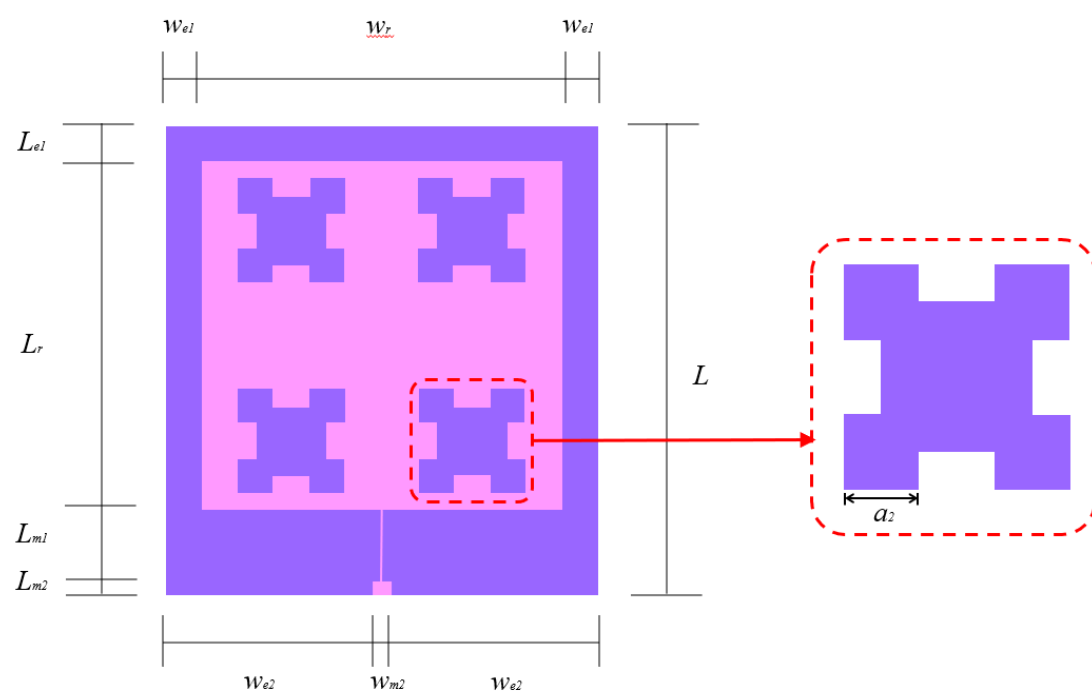
参数名称	W	W_r	L	L_r	W_{e1}	W_{e2}
设计值 (mm)	60	50	67	50	17.5	28.75
参数名称	W_{m2}	L_{e1}	L_{m1}	L_{m2}	h	
设计值 (mm)	2.5	5	10	2	0.254	

根据 3.2 的选型设计原则，提出一种应用类闵可夫斯基 X 分形图案在原矩形贴片天线四周开洞的分形贴片天线设计方法如图 3.11 所示，其中图 3.11a、图 3.11b、图 3.11c 分别是分形迭代次数为 0 次、1 次、2 次时的分形贴片天线，分别命名为 1 阶分形贴片天线、2 阶分形贴片天线与 3 阶分形贴片天线，每种天线的具体尺寸信息如表 3.2 所示。由于图 3.11 中的所有天线均是图 3.10 中的矩形贴片通过对辐射贴片的形状进行变换而得到，故除辐射贴片上的孔洞位置与尺寸信息外，分形天线的其他尺寸信息与原矩形贴片天线完全一致。

该设计方法所得到的分形贴片天线全称应应为一种基于矩形贴片与类闵可夫斯基 X 分形的分形贴片天线，由于名称较为冗长复杂，且该天线贯穿本文后续的所有章节。为了文章简明扼要地表达效果，将从此处及后文中该种天线的名称简化为“分形贴片天线”。



(a) 0阶分形贴片天线 (分形阶数 $n=0$)



(b) 1阶分形贴片天线 (分形阶数 $n=1$)

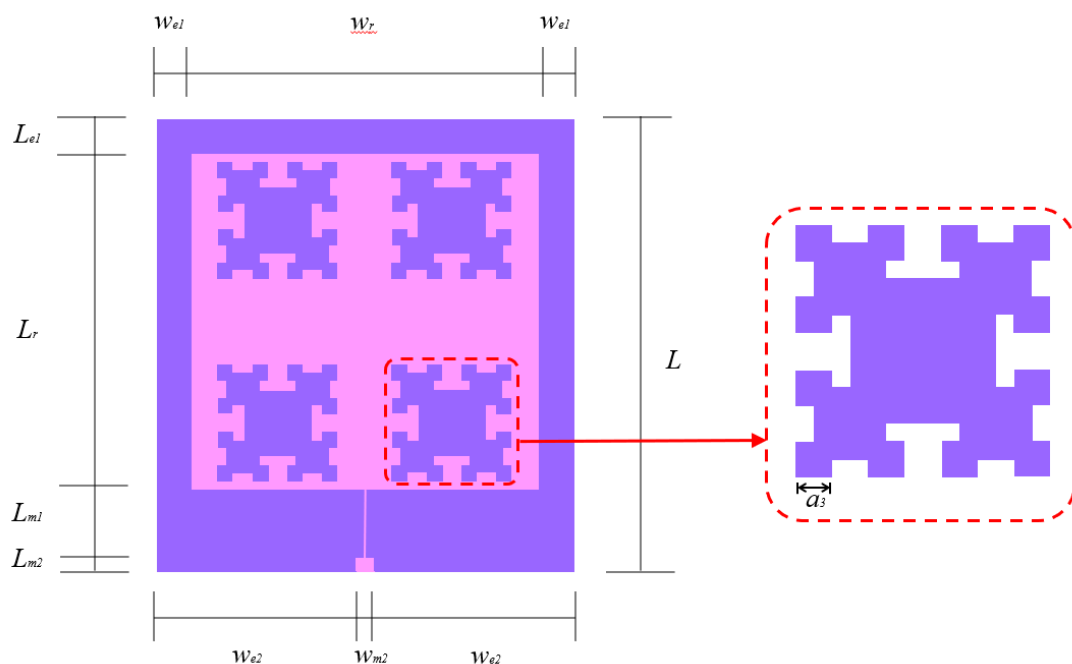
(c) 2阶分形贴片天线 (分形阶数 $n=2$)

图 3.11 分形贴片天线设计尺寸示意图

表 3.2 分形贴片天线具体尺寸参数信息表

参数名称	W	W_r	L	L_r	W_{e1}	W_{e2}
设计值 (mm)	60	50	67	50	17.5	28.75
参数名称	W_{m2}	L_{e1}	L_{m1}	L_{m2}	d_1	d_2
设计值 (mm)	2.5	5	10	2	7.5	5
参数名称	a_1	a_2	a_3			
设计值 (mm)	10	5	2.5			

根据 3.1 中有关的理论定义可知, 该分形贴片天线相对于原矩形贴片天线, 其边缘长度更大且表面形状更为复杂, 可以推测其作为湿度传感器工作时的传感灵敏度更高。

而对于分形贴片天线, 随着分形阶数的提升, 分形贴片天线的边缘长度与表面复杂程度也在逐步增加, 故也可以在同一理论基础下, 推测该种分形贴片天线湿度传感器的湿度传感灵敏度会随着其分形阶数的升高而提升, 其工作谐振频率会随着分形阶数的升高而降低。

以上理论推测可由图 3.12 等效表示。

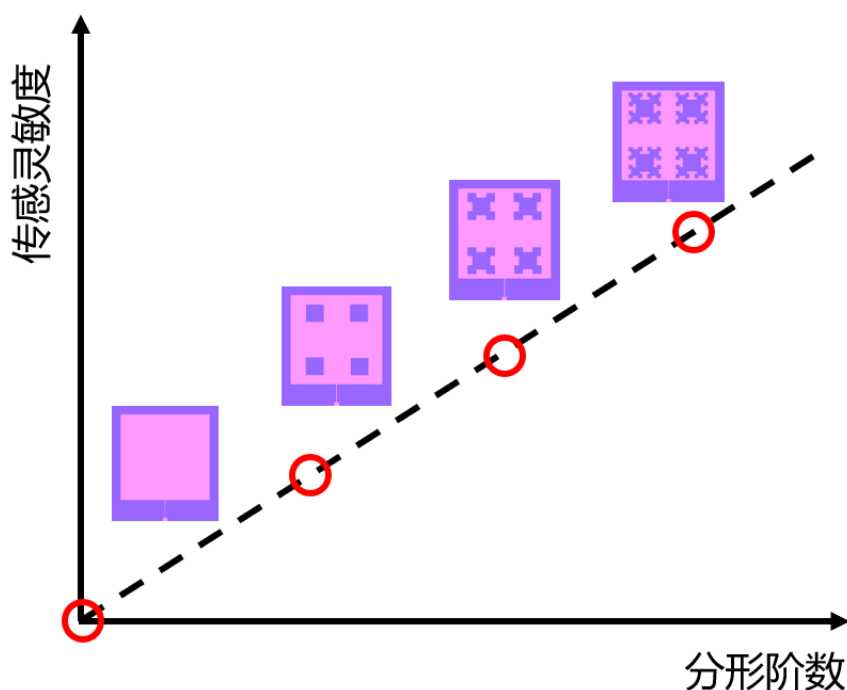


图 3.12 理论推测下分形贴片天线分形阶数与传感灵敏度关系示意图

后续第四章中的仿真与实验会依次验证这些理论假设的正确性和可行性。

3.3 本章小结

本章主要介绍了贴片天线湿度传感器传感模型及高灵敏度的分形贴片天线湿度传感器的设计方案，总结如下：

(1) 介绍了矩形贴片天线监测环境湿度的传感模型，根据传感器灵敏度提升的设计目标，提出了边缘长度理论与传感器湿度传感灵敏增敏机制，并基于闵可夫斯基分形提出了一种更加边缘长度更长、复杂程度更高的类闵可夫斯基 X 分形形式。

(2) 根据贴片天线湿度传感灵敏度增敏机制，以提升灵敏度与实现灵敏度可调节设计为目标，应用在矩形贴片天线表面挖去类闵可夫斯基 X 分形孔洞的方法，提出了一种分形贴片天线湿度传感器的增敏设计方法；并在此方法指导下完成了三种分形贴片天线传感器的具体尺寸参数设计，同时回归设计理论，对三种分形贴片天线传感器的分形阶数与湿度传感灵敏度的关系做出了理论预测，即随着分形阶数的提升，分形贴片天线的传感灵敏度会同步提升。

第4章 基于水泥凝结时间监测的湿度增敏仿真与实验验证

第三章中提出的分形贴片天线湿度传感器可以实现贴片天线湿度传感器的传感灵敏度提升，但是该设计方法的可行性仍然停留在理论阶段。

本章在第三章中设计的分形贴片天线湿度传感器的基础上，以监测水泥凝结时间为具体应用场景，设计并完成了分形贴片天线湿度传感器监测水泥凝结时间的仿真模拟与实际实验，一方面验证了第三章中贴片天线环境湿度传感模型与分形贴片天线传感器湿度增敏机制的正确性，另一方面验证了分形贴片天线的分形阶数控制湿度传感灵敏度设计方案的可行性。

在4.1节中，提出了一种可以验证贴片天线环境湿度传感模型的具体工程应用场景——水泥凝结时间监测，介绍了通过贴片天线传感器来监测水泥凝结时间的基本原理与应用可行性。

在4.2节中，采用HFSS仿真软件对第三章中设计的四种贴片天线进行了模拟。首先，基于平面波馈电，建立了四种贴片天线的基本模型，通过测试初步确定了他们各自的初始谐振频率；随后，在原模型的基础上加入厚度为10mm贴片天线上覆介质层并通过控制该模块的介电常数参数变化，模拟贴片天线监测水泥凝结时间的过程，并得到四种贴片天线的凝结时间监测传感灵敏度的仿真值；通过处理仿真数据，分析了四种贴片天线传感灵敏度与分形阶数的关系。

在4.3节中，首先，基于第三章中的天线设计信息，委托加工了四种贴片天线，采用矢量网络分析仪对这些贴片天线进行了有线测试；随后，设计了水泥凝结时间监测实验，通过四种贴片天线同时对同一批水泥砂浆的凝结时间进行了监测，计算得到了贴片天线监测凝结时间传感灵敏度的实验值，并将最终结果与仿真结果进行了对比。

4.1 贴片天线监测水泥凝结时间理论设计

对于第三章提出的分形贴片天线湿度传感器，可以将其应用于检测水泥将的凝结时间这一具体工程应用场景。将天线内置于水泥净浆内部，则天线的电磁参数会受到上覆水泥净浆的影响，据Balanis等^[104]的研究，这种影响的量级主要与上覆介质的介电常数有关。在本节中，主要推导了水泥净浆凝结过程中，水分的变化过程以及介电常数的变化状态，结合3.1.1介绍的贴片天线湿度传感原理，从理论上完整地论述了贴片天线湿度传感器在这一工程场景中的应用可行性，同时为本章后续的仿真与实验验证提供了应用场景基础，后续将围绕这

一基础场景展开具体的仿真和实验，进一步验证本章所有的理论与假设。

4.1.1 水泥净浆凝结状态下水分变化

在凝结过程中，水泥净浆中的水分将与初始接触时未反应的水泥胶凝材料逐渐进行水化反应而被消耗，同时，由于水泥净浆养护过程中不隔绝空气，在凝结过程中往往伴随着水分的不断蒸发。因此，随着水泥逐渐凝结，水泥的含水率逐渐减少。若将水泥净浆视为匀质材料，水泥净浆的介电常数则几乎与水泥净浆的含水率呈线性相关。当在水泥净浆内部置入贴片天线传感器时，贴片天线传感器的电磁参数与上覆水泥净浆的介电常数相关，从而进一步表征水泥净浆的含水率变化。由于水泥净浆的含水率可以对其凝结状态进行表征，可以采用内置贴片天线传感器，对水泥净浆凝结时间进行预测。

依照 Taylor^[105]的水化反应进程划分，传统硅酸盐水泥的极早期凝结可以分为四个过程：首先是初始反应期，发生于水泥胶凝材料与水进行混合后的数分钟内。在初始反应期，水分消耗剧烈，水泥胶凝颗粒表面迅速形成一层阻碍进一步水化反应的膜层，使水泥净浆进入诱导期。在诱导期，水泥净浆中的水泥胶凝材料与水几乎不反应，水泥净浆中水分的减少主要来自于水分的蒸发。随后，水泥胶凝颗粒表面成膜被缓慢溶解，水泥净浆内部水化反应重启，并迅速进入水化反应加速期。当水泥净浆中大部分胶凝材料反应完全时，水泥净浆水化反应速度减慢，进入水化的后加速期。

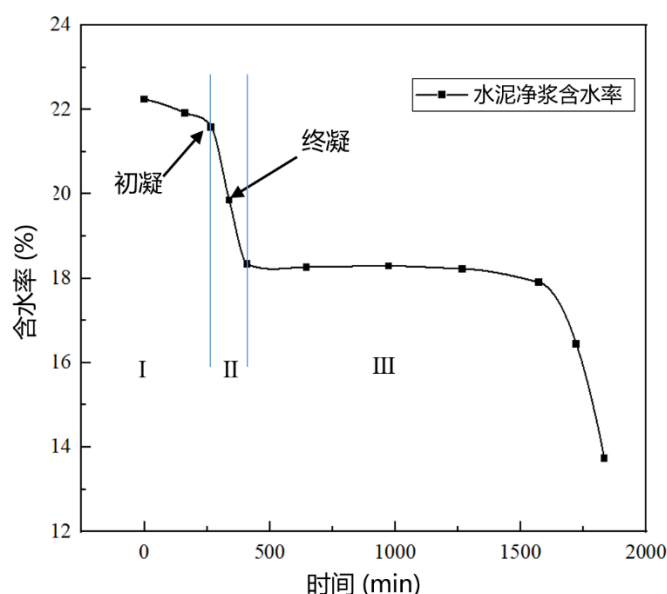


图 4.1 水泥凝结期间含水率-时间关系

在水化反应中，含水率和时间关系如图 4.1 所示。其中，阶段I对应初始

反应期和诱导期，阶段Ⅱ对应水化加速期，阶段Ⅲ对应水化后加速期。其中，初凝发生于阶段Ⅰ后期（诱导期末），此时，水化速度将突然增大，因此，可将含水率第一次突变的时间视为水泥的初凝时间，直接从时间-含水率变化曲线中获得初凝时间。

终凝发生于阶段Ⅱ中期，此时，水泥净浆内部形成完整的 C-S-H 凝胶骨架，早期胶凝材料反应进行大部分，因此，近似认为此时水化反应的速度达到最高，此时，终凝时间可以通过式 4.1 获得：

$$g(t_{fin}) > g(t_{fin} \pm \Delta t) \quad \Delta t \in R \quad (4.1)$$

其中， t_{fin} 为终凝时间， Δt 为无穷小时间变量， $g(t_{fin})$ 为含水率在终凝时间的变化率，等于含水率 $f(t)$ 在该点对时间的导数，由式 4.2 进行定义：

$$g(t) = f'(t) \quad (4.2)$$

由式 4.1 和式 4.2，凝结时间测试有赖于含水率测试，因此，为定量表征测试精准程度，本文并未采取凝结时间监测，而是采用含水率监测作为表征对象，进行灵敏度精度比较研究。

4.1.2 水泥净浆凝结状态下介电常数变化

水泥净浆作为水、水泥固相、空气三者的混合材料^[106]，其介电常数与各组分的介电常数和占比有关，可用式 4.3 进行表示^[107]：

$$K^\alpha = f_1 K_w^\alpha + f_2 K_{solid}^\alpha + f_3 K_{air}^\alpha \quad (4.3)$$

其中， f_1 为水泥净浆中水分占比， f_2 为水泥固相占比， f_3 为空气占比； K_w 为水的测定介电常数， K_{solid} 为水泥固相的一般介电常数， K_{air} 为空气的介电常数， α 为经验系数。据 Sun 等^[107]的研究，水泥净浆中各相的介电常数取值如表 4.1 所示。

表 4.1 水泥净浆各相介电常数取值

参数名称	液相	固相	气相	α
主要材料	水	胶结材料	空气	/
介电常数	84	1.284	1	0.5

由于液相的介电常数远大于固相和气相介电常数，为简化计算过程，在水泥净浆的整体介电常数计算流程中，将固相和气相介电常数合并考虑，如式 4.4 所示^[100]：

$$K^\alpha = f_1 K_w^\alpha + (f_2 + f_3) K_{solid}^\alpha \quad (4.4)$$

在凝结过程中，由于水化反应及水分的蒸发效应，水泥净浆中的水分占比会持续减小，导致水泥净浆的整体介电常数不断降低。参考 Yi 等^[100]的研究，

把水泥极早期凝结阶段含水率变化范围定为 25%至 10%，则水泥净浆的介电常数变化如图 4.2 所示。

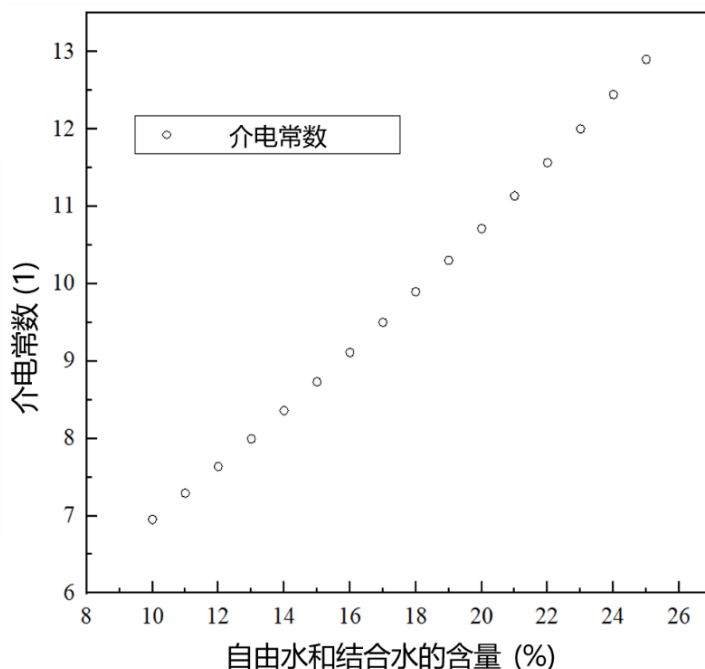


图 4.2 水泥水化阶段介电常数-含水率关系

由图 4.2 可知，在水泥处于早期凝结状态时，水泥净浆含水率降低，水泥净浆介电常数随之线性下降。因此，可以通过对介电常数进行监测，表征水泥净浆含水率变化趋势和变化率，进而监测水泥净浆的凝结时间。

4.2 传感器仿真分析

在本节中，利用 HFSS 高频仿真软件对矩形贴片天线与分形阶数依次增加的三个分形贴片天线进行了建模，在四种天线模型上部添加了上覆介质模块以及引入了介电常数变化参数来模拟贴片天线传感器监测水泥凝结时间的过程。通过对天线传感器监测水泥凝结时间模拟测试，根据仿真结果计算得出了矩形贴片天线与所有分形贴片天线的传感灵敏度，通过比较四种贴片天线传感器的凝结时间监测灵敏度，初步证明了贴片天线湿度传感模型、边缘长度理论以及分形贴片天线传感器湿度增敏机制的正确性，也验证了以及分形贴片天线传感器分形阶数控制湿度传感灵敏度设计方案的可行性。

4.2.1 HFSS 建模

在 HFSS 高频仿真软件中建立如下图 4.3 所示的四种贴片天线监测水泥凝结时间的电磁仿真模型。在该类模型中，所有天线的尺寸信息与第三章中的设计方案一致，四种贴片天线的基板材料均采用 RT5880 高频压合板，其介电常数为 2.2，且保证仿真中环境温度恒定，对基板介电常数与覆铜尺寸没有影响。所有天线整体均采用平面波馈电，为了模拟无限远处的天线辐射效应，设置边界为 PML 辐射吸收边界，降低算力需求；由于金属作为良性导体，平面波的趋肤深度很低，天线的上辐射贴片、节点平面在仿真中采用无厚度平面，并将边界设置为完美电壁（Perfect E）来对良性导体平面进行模拟。所有模型中贴片天线的上部增加一层厚度为 10mm 的等效水泥净浆层，且如图 4.4 所示，设置该水泥净浆层的介电常数为变化参数进行遍历计算用于模拟凝结过程。

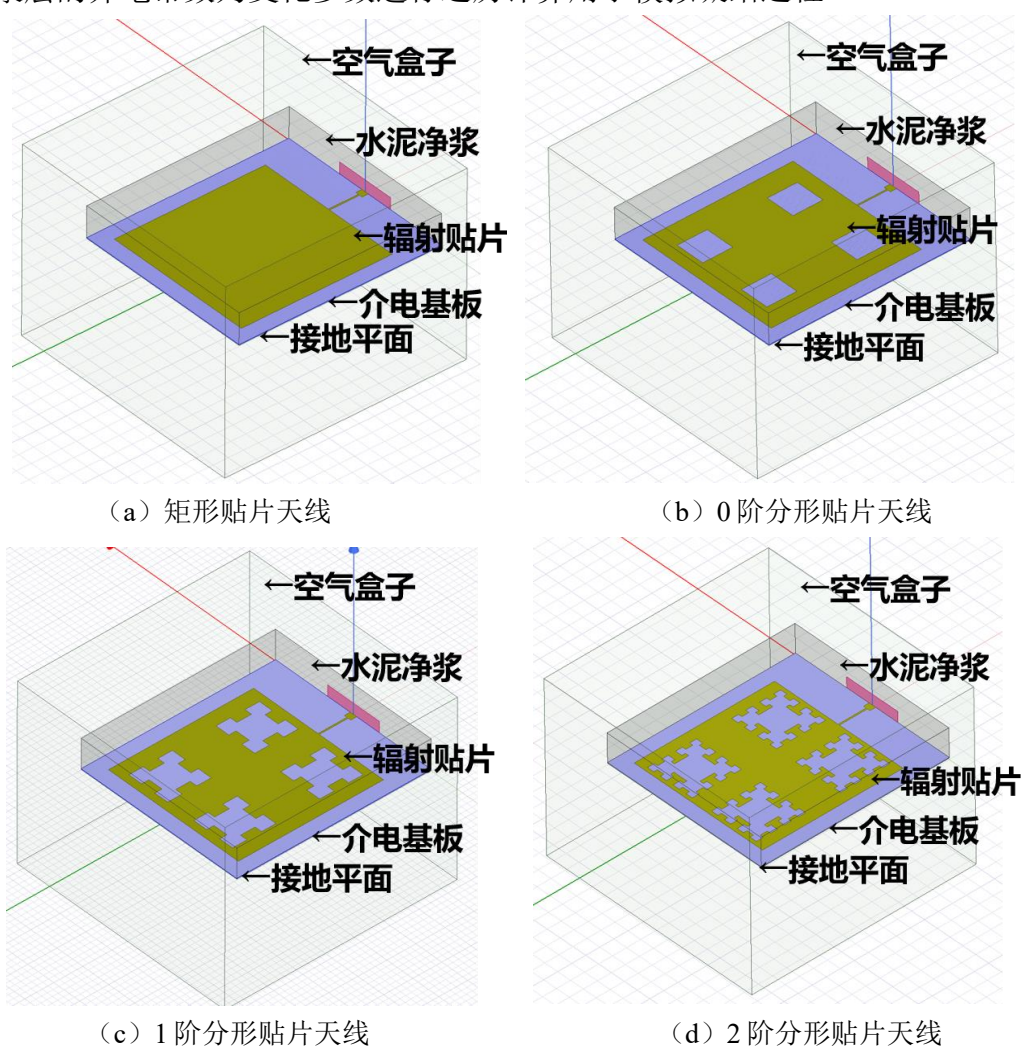


图 4.3 HFSS 中贴片天线监测水泥凝结时间模型图

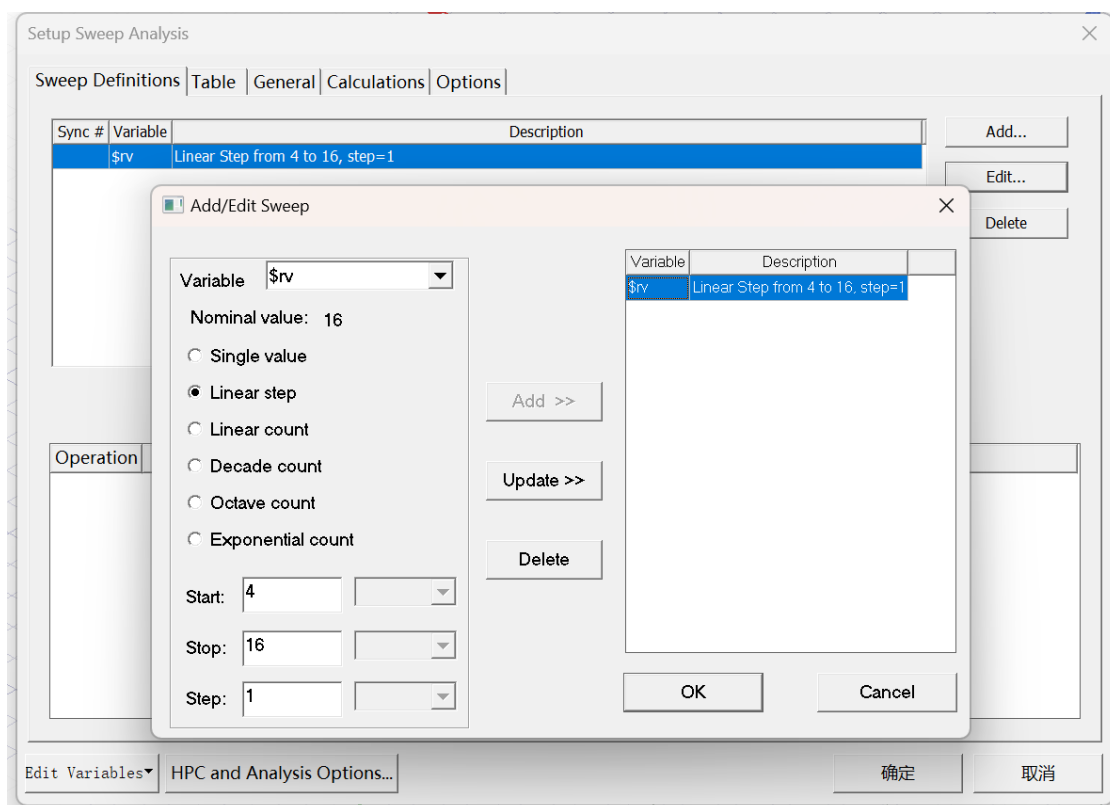


图 4.4 HFSS 中等效水泥净浆的介电常数变化参数设置图

HFSS 模型中天线传感器各部分的相对介电常数如下表 4.2 所示, 其中 ε_1 为基板介电常数, ε_2 为上覆水泥净浆的介电常数 (湿度最高的初始状态为 16, 凝结结束后的干燥状态为 4), ε_3 为空气的介电常数。

表 4.2 HFSS 仿真模型中天线传感器各部分的相对介电常数

参数名称	ε_1	ε_2	ε_3
相对介电常数	2.2	16-4	1

在 HFSS 中通过对水泥净浆介电常数变化参数的遍历计算, 可以根据计算数据绘制出矩形贴片天线传感器监测水泥凝结时间过程的 S11 曲线组如图 4.5 所示。由图可知, 随着水泥水化过程的进行, 水泥的相对介电常数逐渐减小, 在这个过程中, 贴片天线传感器的谐振频率随之逐渐增大, 且谐振频率处的回波损耗也随之逐渐减小, S11 图像中天线谐振频率点的偏移呈现出单调增大的趋势。因此, 贴片天线谐振频率变化表征上覆水泥含水量变化的传感过程运作情况良好, 该湿度传感模型的可行性在仿真中得到初步验证。

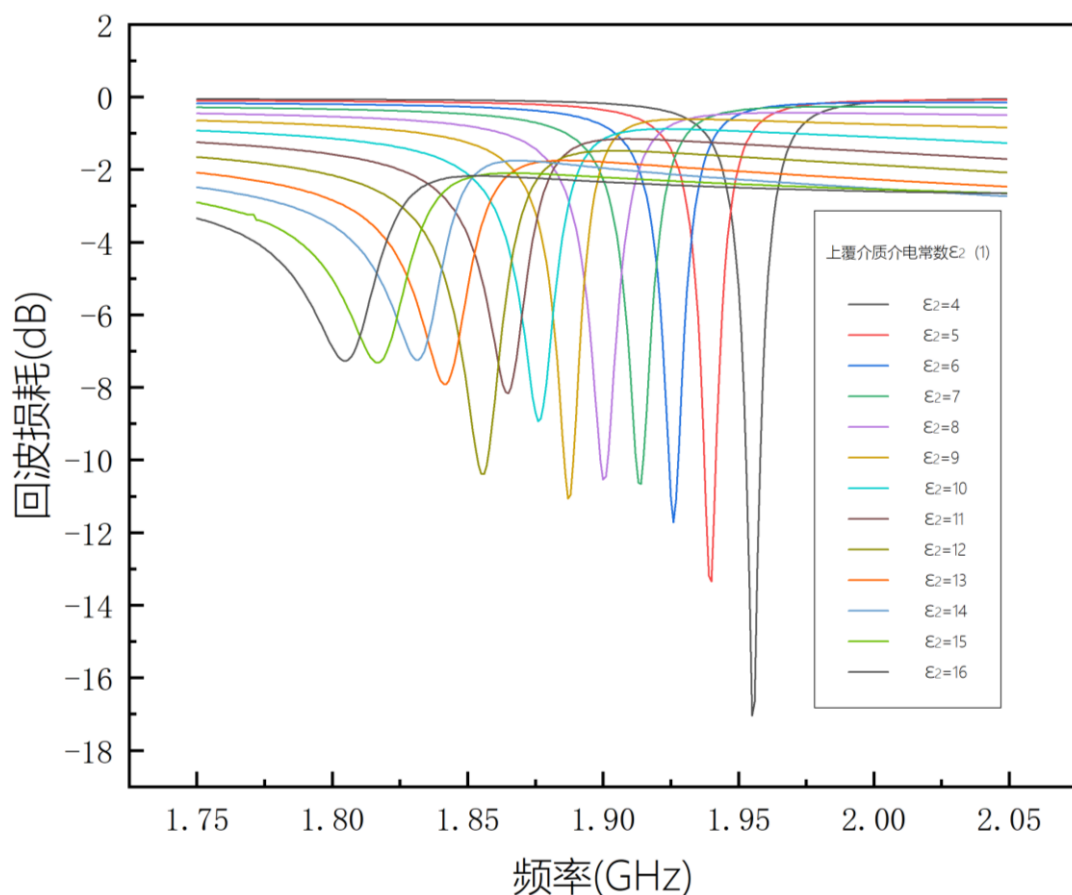


图 4.5 仿真中矩形贴片天线随上覆水泥介电常数从 4-16 变化时的 S11 曲线组图

4.2.2 模拟结果

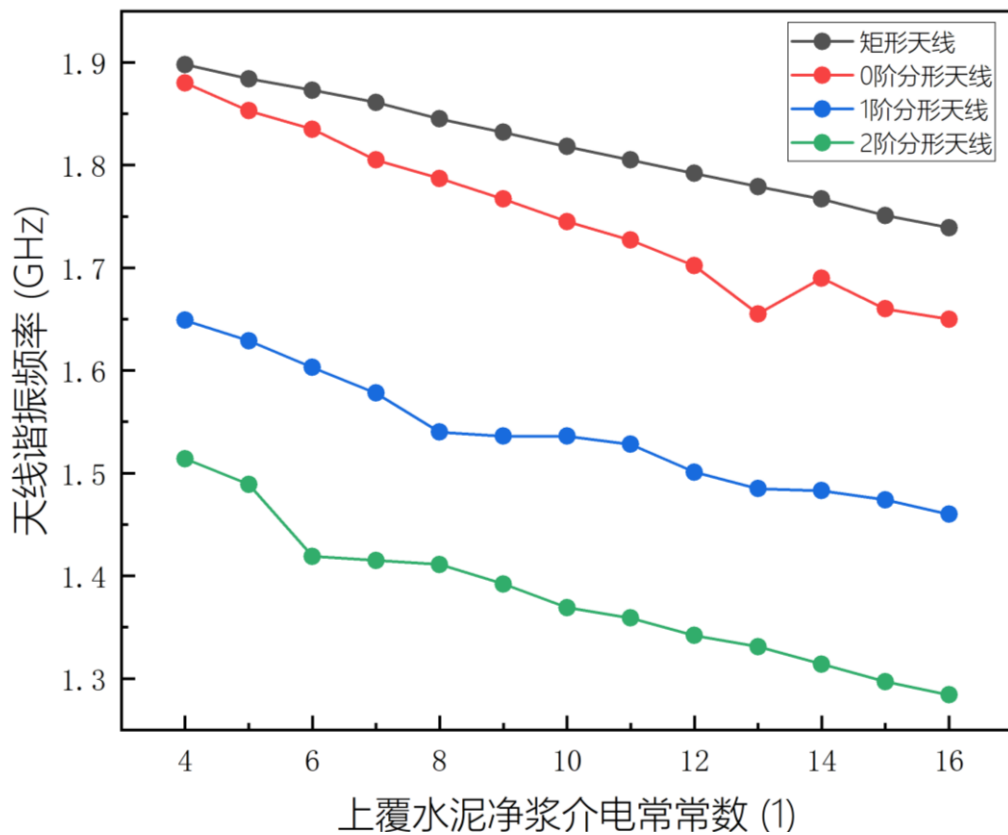
根据仿真计算得到的四种贴片天线监测水泥凝结过程的 S11 曲线，可以从他们中提取的谐振频率信息如表 4.3 所示。

根据表 4.3 中的数据，可以绘制上覆水泥净浆介电常数 ϵ_2 变化时四种天线的谐振频率变化趋势情况如图 4.6 所示。由图可知，仿真数据呈现的规律基本符合传感理论模型，随着上覆水泥净浆介电常数 ϵ_2 逐渐降低，四种贴片天线的谐振频率均单调升高。

其中，为了简化表达并且便于后续的数据分析与绘图，在本文中规定原矩形贴片天线的分形阶数为-1，后续在各图表中出现分形阶数为-1 的天线均视为矩形贴片天线。

表 4.3 仿真中上覆水泥净浆介电常数 ϵ_2 变化时四种天线的谐振频率变化信息

水泥净浆 介电常数 ϵ_2	矩形天线 谐振频率 (GHz)	0阶分形天线 谐振频率 (GHz)	1阶分形天线 谐振频率 (GHz)	2阶分形天线 谐振频率 (GHz)
16	1.739	1.65	1.46	1.284
15	1.751	1.66	1.474	1.297
14	1.767	1.69	1.483	1.314
13	1.779	1.655	1.485	1.331
12	1.691	1.702	1.501	1.356
11	1.805	1.727	1.528	1.359
10	1.818	1.745	1.536	1.369
9	1.832	1.767	1.536	1.392
8	1.845	1.787	1.54	1.411
7	1.861	1.805	1.578	1.415
6	1.873	1.835	1.603	1.441.9
5	1.884	1.853	1.629	1.489
4	1.898	1.88	1.649	1.514

图 4.6 仿真中上覆水泥净浆介电常数 ϵ_2 变化时四种天线的谐振频率变化情况

由于贴片天线监测水泥凝结时间的传感模型实际上是监测上覆水泥净浆的

含水率，即 3.1.1 中的贴片天线湿度传感模型，故贴片天线监测凝结时间的灵敏度可以视为贴片天线湿度传感器的湿度感知灵敏度。

由于本文的研究主要聚焦于湿度感知灵敏度，故本文中将分形贴片天线应用于水泥凝结时间监测模型时，研究过程为从水泥浇筑前到终凝结束之后的水泥凝结全过程。故基于 Yi 等^[108]提出的贴片天线监测水泥凝结时间的传感灵敏度公式，为简化计算，提出水泥凝结时间监测传感灵敏度 S 的公式如式 4.5 所示。

$$S = \frac{f_0 - f_{min}}{f_0} \times 100\% \quad (4.5)$$

其中 f_0 为贴片天线的初始谐振频率， f_{min} 为水泥凝结过程中贴片天线谐振频率的最小值。对于贴片天线的初始谐振频率 f_0 ，可以通过在 HFSS 的模型中删除贴片天线上覆的等效水泥净浆层之后对贴片天线进行模拟计算得到，第五章中有详细的模拟过程与结果分析。

故根据式 4.5 以及本节在 HFSS 中模拟得到的四种贴片天线的谐振频率数据，可以计算仿真中四种贴片天线的传感灵敏度及其提升率如表 4.4 所示（矩形贴片天线的分形阶数为-1）。

表 4.4 仿真计算所得的四种贴片天线传感器的传感灵敏度信息

天线分形阶数 n	-1	0	1	2
初始谐振频率 f_0 (GHz)	1.94	1.909	1.743	1.601
谐振频率最小值 f_{min} (GHz)	1.739	1.65	1.46	1.284
传感灵敏度 S (%)	10.36%	13.57%	16.24%	19.80%
传感灵敏度提升率 (%)	/	30.98%	56.76%	91.12%

由表 4.4 中四种贴片天线传感器的传感灵敏度信息，可以绘制仿真所得的分形阶数与分形贴片天线传感器传感灵敏度的关系图如下图 4.7 所示。

由图 4.7 可知，在水泥凝结时间监测的应用场景下，分形贴片天线的湿度感知灵敏度优于原矩形贴片天线，且随着分形阶数的增加，分形贴片天线的湿度感知灵敏度持续提升。

结合分形贴片天线分形阶数提升导致边缘长度增加的现象，图 4.7 的结果从仿真层面论证了边缘长度理论与分形贴片天线传感器湿度增敏机制的正确性，即辐射贴片的边缘长度增加会使贴片天线的湿度感知灵敏度提升；同时根据增敏机制，图 4.7 的结果也从仿真层面验证了分形贴片天线传感器分形阶数控制湿度传感灵敏度设计方案的可行性。且由表 4.4 可知，该增敏设计方案下，仿真中的 3 阶分形贴片天线传感器相比原矩形贴片天线传感器传感灵敏度提升了 91.12%，接近原来灵敏度的一倍。

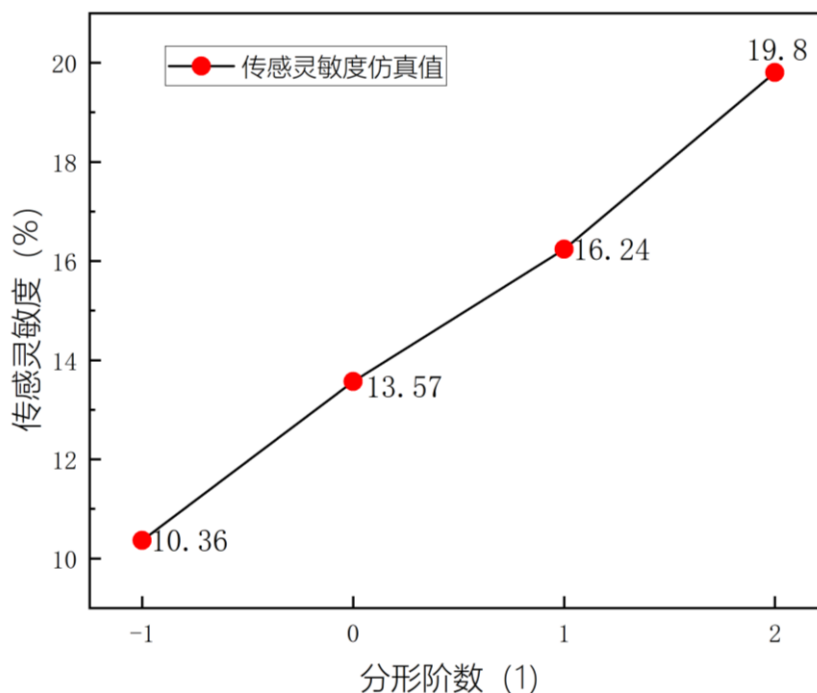


图 4.7 仿真中分形阶数与贴片天线传感灵敏度关系图

4.3 实验验证与结果讨论

在 4.2 中, 分形贴片天线传感器湿度增敏机制的正确性以及增敏设计方案的可行性已经通过仿真手段得到初步验证。本节中, 通过委托加工贴片天线以及设计水泥凝结时间监测实验方案, 完成了分形贴片天线谐振频率测试实验以及水泥凝结时间监测实验。

在本实验中, 通过调制足量的水泥砂浆, 将这同一批水泥砂浆同时浇注在均已做好防水封装的四种贴片天天线传感器上, 在固定时间间隔下, 通过矢量网络分析仪及同轴线有线测量记录了每个贴片天线的谐振频率并利用维卡仪完成了凝结时间测定^[108]。最终通过处理、分析所记录的谐振频率数据, 计算了四种贴片天线在同一监测条件下的凝结时间监测灵敏度, 并将得到的实验结果与理论假设和仿真模拟结果进行对比, 根据三者比较结果的一致性, 证明了仿真模拟结果的合理性, 也从实验层面再次验证了理论的正确性以及设计方案的可行性。

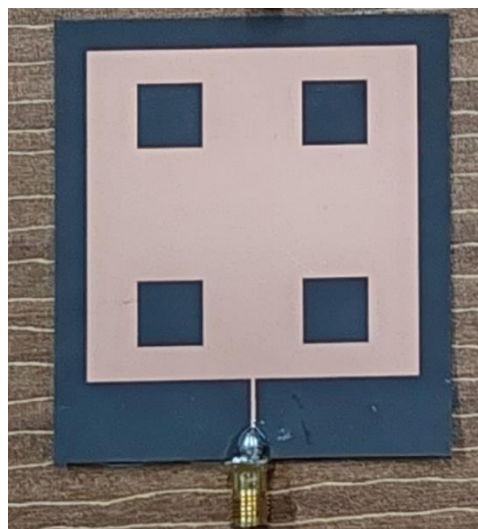
4.3.1 实验设计

将第三章中设计的四种贴片天线的具体尺寸图纸交由专业的第三方天线加工机构并委托其根据 3.2 中的具体设计方案加工, 得到了四种贴片天线如图 4.8

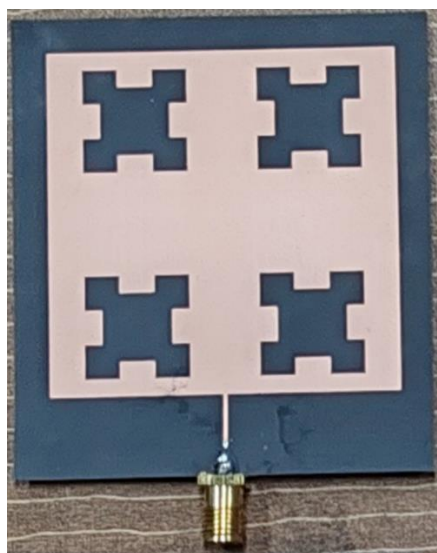
所示。这些加工的天线镀铜工艺为 OPS 抗氧化处理，表面十分光滑，图案尺寸精细化程度高，完全符合 3.2 中的设计方案，适合作为天线传感器使用。



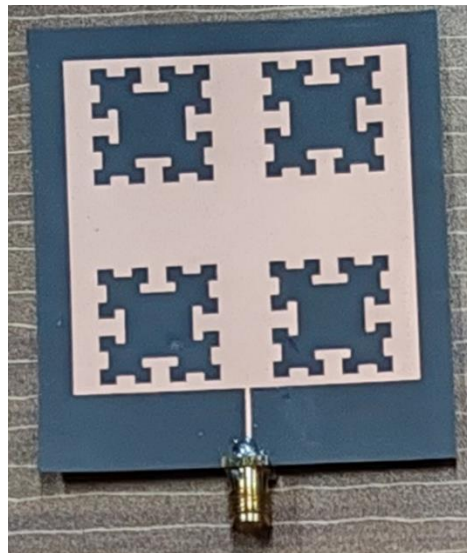
(a) 矩形贴片天线



(b) 0 阶分形贴片天线



(c) 1 阶分形贴片天线



(d) 2 阶分形贴片天线

图 4.8 加工所得的贴片天线实物图

对于凝结时间监测所用的水泥，选用 PI.42.5 级水泥配置正常稠度的水泥浆体，水泥砂浆由水泥与水按照水灰比 1:3 混合而成。如图 4.9 所示，由于贴片天线与水直接接触会导致测量贴片天线的谐振频率失真，因此在贴片天线表面封装一层塑料薄膜进行防水，且为与理论与仿真中的传感监测模型保持一致，将贴片天线的防水封装放置在固定尺寸的亚克力盒中，贴片天线通过预留孔内的同轴连接线与矢量网络分析仪相连。



图 4.9 放置在亚克力盒子中且带有防水封装的矩形贴片天线传感器

实验开始时，将搅拌均匀的水泥砂浆倒入四个含有不同贴片天线的亚克力盒中，并从倒入后开始计时，使用矢量网络分析仪监测四个贴片天线的谐振频率如图 4.10 所示，且每间隔 10 分钟用矢量网络分析仪记录一次四个天线的谐振频率并使用维卡仪测定、记录凝结时间如图 4.11 所示。

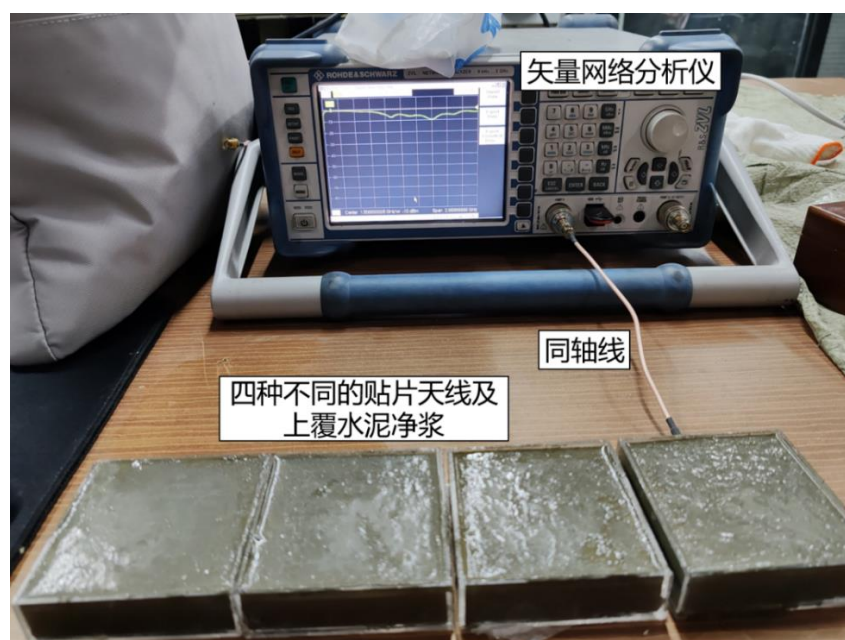


图 4.10 矢量网络分析同时监测四种贴片天线传感器在水泥水化过程中谐振频率的变化



图 4.11 利用维卡仪测定水泥凝结时间

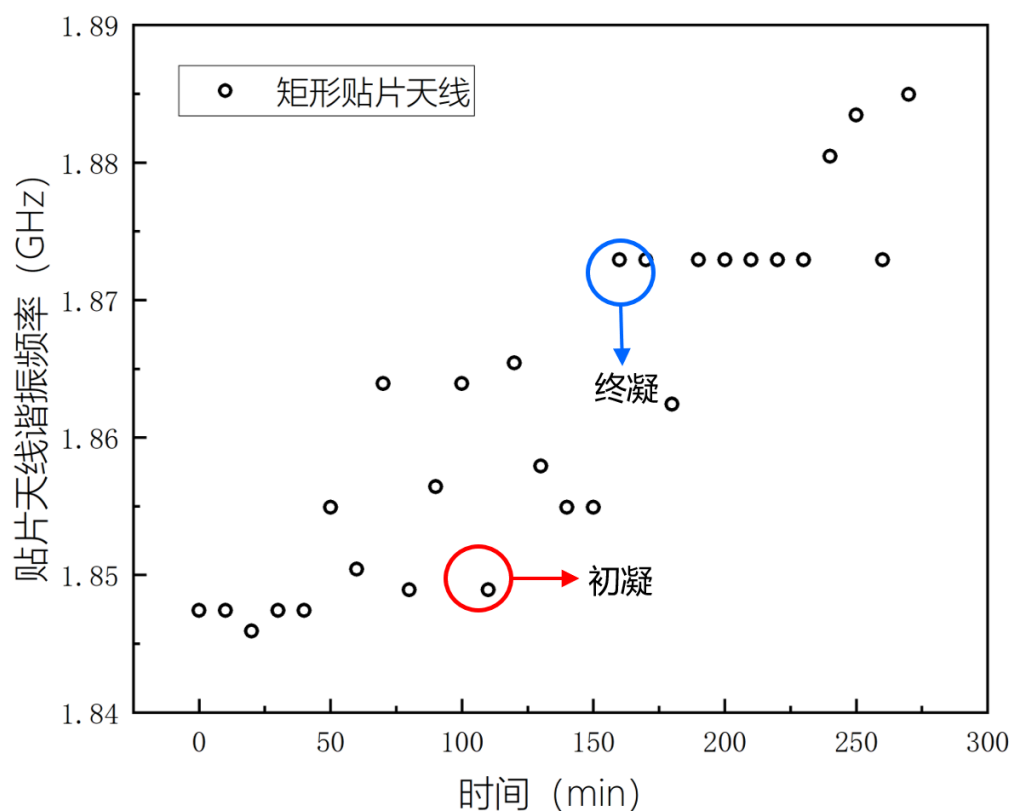
实验中所涉及各类环境参数如表 4.5 所示，由于同时监测四个天线传感器，故每个天线传感器的实验环境均保持一致。

表 4.5 贴片天线传感器监测水泥凝结时间实验环境参数

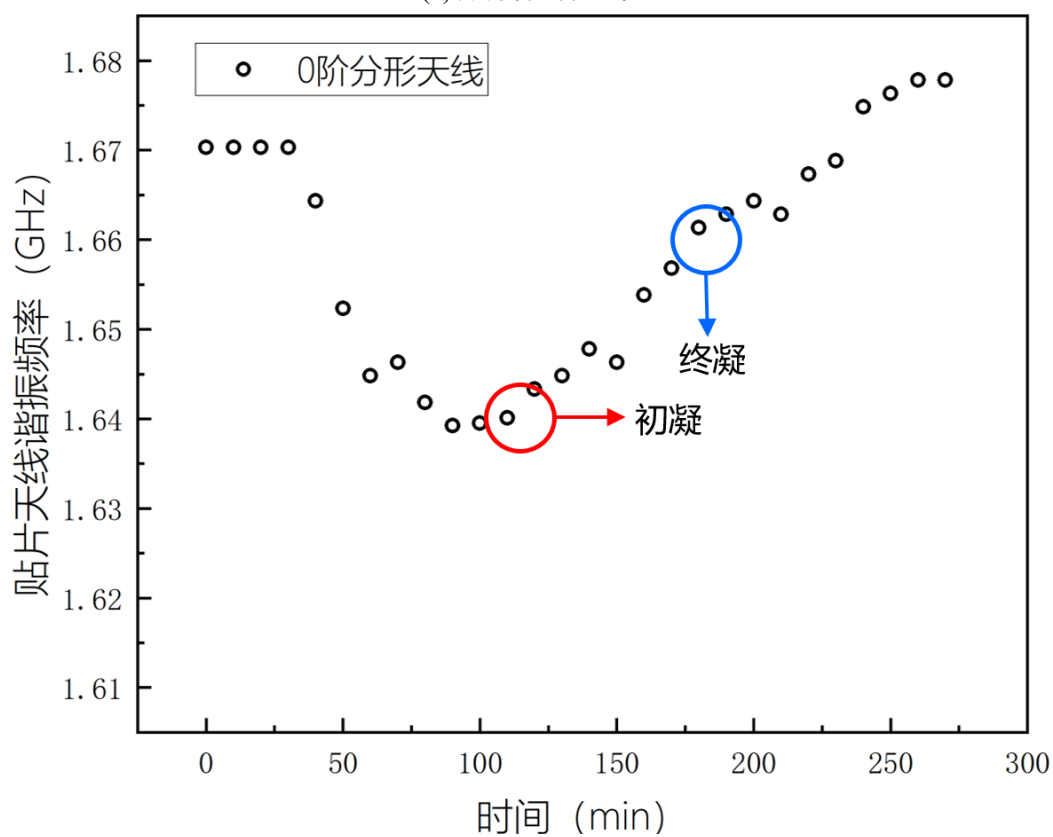
环境参数	亚克力盒子尺寸 (mm ³)	水泥砂浆层厚度 (mm)	水灰比	环境温度 (℃)	环境湿度 (%)
参数值	74×74×10	10	1:3	15	41

4.3.2 实验数据分析

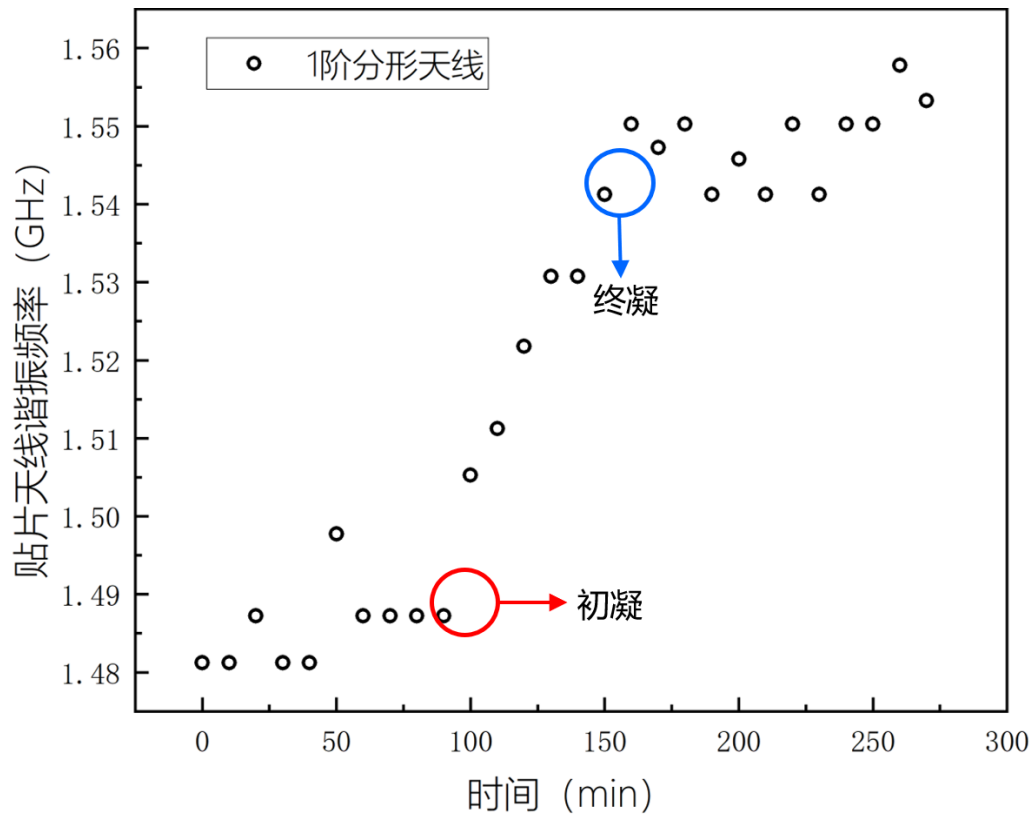
由于从浇注水泥砂浆到终凝结束后的 1h 左右的时间，每十分钟会记录一次所有贴片天线传感器的 S11 数据，故对每种贴片天线均可以提取其每一次记录的数据中的谐振频率信息，将四种贴片天线在水泥凝结全过程中的谐振频率按照记录时间的先后顺序可以绘制得到各自的谐振频率与时间的关系图如图 4.12 所示，并可以根据 Yi 等^[108]提出的初凝时间与终凝时间的判定方法，在图像中大致判断并标注出初凝和终凝时贴片天线的谐振频率点如图 4.12 中的圈状标注所示。



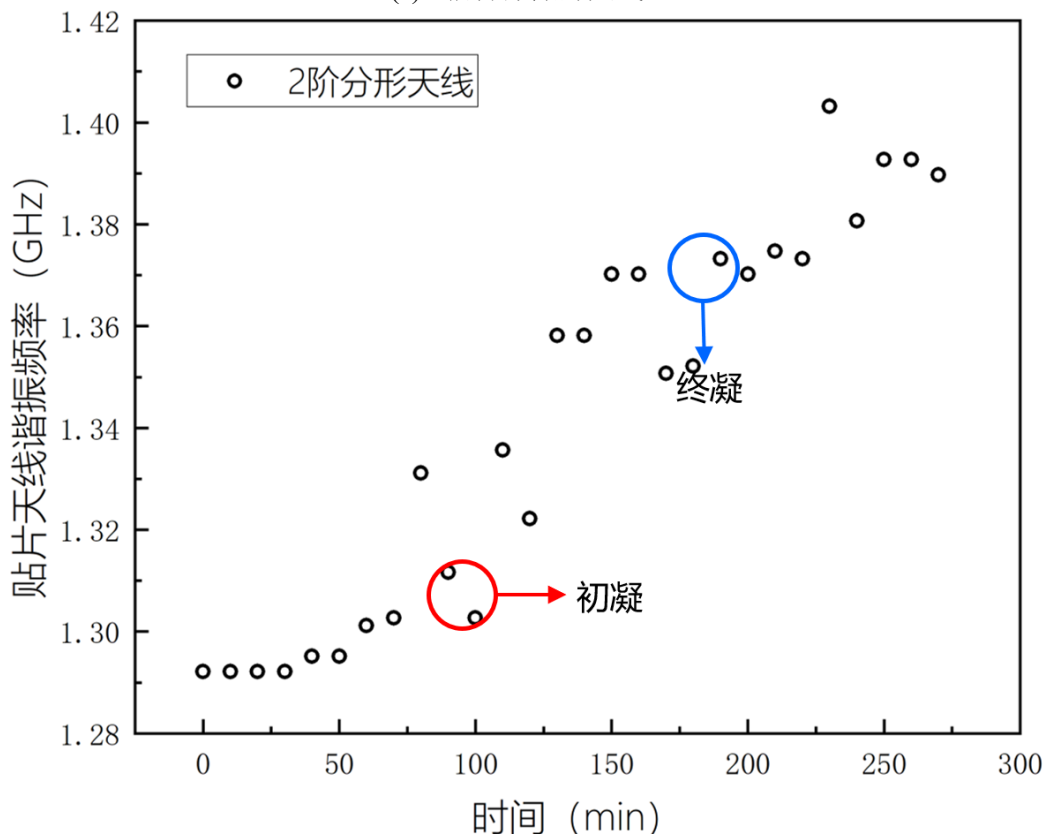
(a) 矩形贴片天线



(b) 0阶分形贴片天线



(c) 1阶分形贴片天线



(d) 2阶分形贴片天线

图 4.12 凝集时间监测实验中各贴片天线传感器谐振频率与时间关系图

通过读取四组贴片天线传感器监测所得的同一批水泥砂浆初凝和终凝时间，可以与维卡仪测试所得的初凝与终凝时间对比，如表 4.6 所示。

表 4.6 维卡仪测得的凝结时间与贴片天线传感器监测所得的凝结时间对比

监测方式	初凝时间 (min)	终凝时间 (min)
维卡仪	110	180
贴片天线传感器	100-110	160-180

由于水泥凝结时间监测实验中影响贴片天线谐振频率的因素较多，实验不确定性大，且 10min 的监测步长所测得的数据点较为有限，故谐振频率与时间关系图中的数据点规律性较差，但仍能由此大致判断出水泥砂浆的初凝与终凝时刻所在的时间范围，且维卡仪所测得的较为准确的初凝与终凝时间点在该时间范围内，故通过贴片天线监测水泥凝结时间的实验结果基本符合实际情况，贴片天线监测水泥凝结时间所利用的贴片天线湿度传感模型理论的有效性也得以验证。

对于四种贴片天线传感器的凝结时间监测传感灵敏度，将实验中所测得四种贴片天线的谐振频率信息代入式 4.5（贴片天线的初始谐振频率可以通过矢量网络分析仪与同轴线直接测量记录贴片天线的 S_{11} 曲线并从中提取得到，第五章中有详细的实验过程与结果分析），可以计算该实验中四种贴片天线的传感灵敏度及其提升率如表 4.7 所示（矩形贴片天线的分形阶数为-1）。

表 4.7 实验实测所得的四种贴片天线传感器的传感灵敏度信息

天线分形阶数 n	-1	0	1	2
初始谐振频率 f_0 (GHz)	1.953	1.936	1.774	1.647
谐振频率最小值 f_{min} (GHz)	1.846	1.639	1.487	1.303
传感灵敏度 S (%)	5.48%	15.34%	16.16%	20.91%
传感灵敏度提升率 (%)	/	179.81%	194.83%	281.34%

由表 4.7 中四种贴片天线传感器的传感灵敏度实验值，可以绘制实验所得的分形阶数与分形贴片天线传感器传感灵敏度的关系图如下图 4.13 所示。

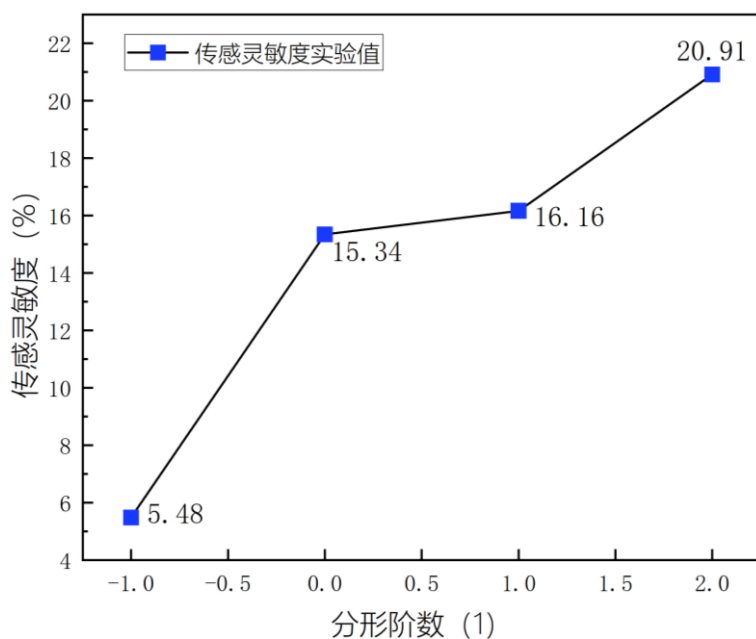


图 4.13 实验中分形阶数与贴片天线传感灵敏度关系图

由图 4.13 可知,水泥凝结时间监测实验中分形贴片天线的传感灵敏度明显高于矩形贴片天线,且随着分形阶数的增加,分形贴片天线的传感灵敏度也呈现提升趋势。且由表 4.7 可知,在该增敏设计方案下,实验中的 2 阶分形贴片天线传感器相比原矩形贴片天线传感器传感灵敏度提升了 281.34%,在实测情况中实现了矩形贴片天线传感灵敏度近三倍的提升效果。

4.3.3 实验结果讨论

为便于比较分析,将 4.2 中模拟得到的四种贴片天线水泥凝结时间监测灵敏度数据与本小节中实验测得的四种贴片天线传感灵敏度数据按照分形阶数的依次增加的规律绘制在同一张关系图中,得到图 4.14 如下所示(其中矩形贴片天线的分形阶数视为-1)。

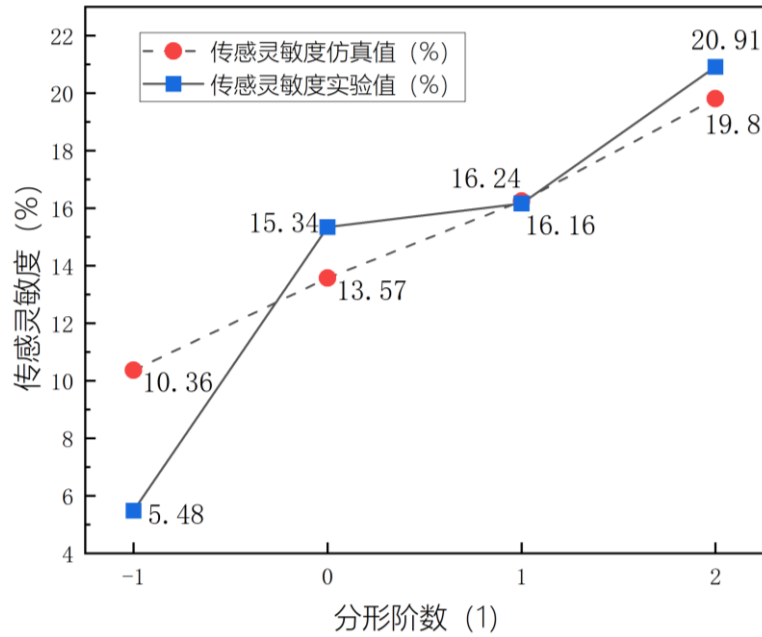


图 4.14 四种贴片天线传感灵敏度仿真值与实验值对比图

由图 4.14 可知, 分形贴片天线凝结时间监测传感灵敏度的仿真值与实验值基本一致, 以理论模型下的仿真计算值为基准, 分形贴片天线的实验值的相对误差均在 15%以内 (0 阶分形贴片天线的传感灵敏度实测值与仿真值误差高达 13%, 其余两种分形贴片天线的测试误差在 1%以内)。

矩形贴片天线的传感灵敏度的实验值小于仿真值, 且相对仿真值差距较大, 接近 50%; 而 0 阶分形贴片天线的实验值大于其仿真值, 且相对仿真值差距比其他两种分形贴片天线较大, 接近 15%。造成实验值与仿真值相差较大的原因可能是同一批水泥砂浆由于搅拌不均匀, 在分配到四个埋置不同贴片天线的亚克力盒时, 矩形贴片天线上覆的水泥砂浆水灰比小于 1:3, 而 0 阶分形贴片天线上覆的水泥砂浆水灰比大于 1:3, 由此造成两者的最小谐振频率分别大于和小于水灰比为 1:3 时的谐振频率理论值, 导致传感灵敏度实验值分别小于和大于符合理论预测的仿真值; 造成这种误差的另外原因可能是矩形贴片天线亚克力盒拼接不密实而发生水泥中自由水外露, 水泥砂浆含水率降低导致谐振频率比理论值偏高, 故传感灵敏度测试结果降低, 以及 0 阶分形天线的防水封装破损出现漏水情况, 导致水与贴片天线存在直接接触的情况, 造成贴片天线短路从而谐振频率比理论值更低, 故传感灵敏度测试结果升高。

分别观察仿真值与实验值两条数据点连接的曲线, 可以发现两者均具有单调递增性, 即随着分形阶数的增加, 分形贴片天线的传感灵敏度在仿真与实验中均一致保持提升趋势 (0 阶分形贴片天线的传感灵敏度在仿真和实验中也都小于原矩形贴片天线的传感灵敏度)。贴片天线监测水泥凝结时间的实验结果与仿

真结果的一致，不仅验证了仿真的合理性，也在仿真初步验证理论假设的基础上，进一步以实际实验证明了第三章中边缘长度理论与湿度增敏机制的正确性与分形贴片天线的分形阶数控制湿度传感灵敏度设计方案的可行性。

4.4 本章小结

本章介绍了贴片天线监测水泥凝结时间的基本原理，并完成了矩形贴片天线与分形贴片天线监测水泥凝结时间的仿真与实验，总结如下：

（1）介绍了贴片天线监测水泥凝结时间的理论模型，从理论上阐述了贴片天线湿度传感器应用于监测水泥凝结时间的具体原理和监测方案的可行性。

（2）利用 HFSS 仿真软件对矩形贴片天线和分形贴片天线监测水泥凝结时间这一过程进行了模型搭建和仿真模拟。得到了四种贴片天线的凝结时间监测传感灵敏度的仿真值，其中 2 阶分形贴片天线的传感灵敏度相比原矩形贴片天线提升了近 1 倍，传感灵敏度仿真值与分形阶数的线性正相关关系也符合边缘长度理论与湿度增敏机制的理论预测。模拟结果也验证了分形贴片天线的分形阶数控制湿度传感灵敏度设计方案的可行性。

（3）对第三章中提出的四种贴片天传感器进行了委托加工，并分别对其进行了水凝结时间监测实验。在实验中，分别对比维卡仪与贴片天线测得的水泥凝结时间，验证了贴片天线监测水泥凝结时间模型的实际可行性，也进一步验证了贴片天线湿度传感模型的正确性；根据贴片天线监测凝结时间传感灵敏度的实验结果，2 阶分形贴片天线在实际实验中实现了近 3 倍的增敏效果，且传感灵敏度实验值与分形阶数的关系也呈现出线性正相关关系，与仿真结果完全一致，在实验层面验证了边缘长度理论与增敏设计方案的实际可行性。同时，矩形贴片天线和 0 阶分形贴片天线的传感灵敏度与仿真值相差较大，推断可能是由于水泥砂浆搅拌不均匀、亚克力盒子拼接不密实或天线防水封装出现破损造成，需要在后续设计中进行更加完备的考虑和修正措施。

第 5 章 分形贴片天线湿度传感器小型化研究

第三章中提出的分形贴片天线湿度传感器可以实现贴片天线传感器的湿度增敏设计，第四章中水泥凝结时间监测仿真与实验也验证了这一点。除此之外，这种基于分形孔洞的设计方法同样可以实现矩形贴片天线的小型化；在分形孔洞设计方法的基础上，还可以引入中部矩形孔洞，将尺寸与传感灵敏度参数进行解耦设计，使分形贴片天线传感器在保持传感灵敏度几乎不变的情况下继续实现湿度退敏的小型化设计。

本章主要通过理论假设、仿真计算、实验验证的研究路线分形并验证了分形贴片天线与带有中部矩形孔洞的分形贴片天线两种传感器的小型化设计原理及其设计方法的可行性。其中由分形阶数控制天线尺寸的分形贴片天线设计方法能够使传感器灵敏度提高并同时实现传感器的小型化设计，而带有中部孔洞的分形贴片天线主要通过控制中部矩形孔洞的边长使分形贴片天线传感器湿度灵敏度基本不变的同时实现小型化设计。

从灵活设计天线的需求出发，两种方法相结合便可以实现贴片天线传感器的尺寸与传感灵敏度的解耦设计。通过调节分形阶数与中部矩形孔洞边长两个控制参数即可实现贴片天线初始谐振频率与灵敏度的双向调节，从而实现贴片天线传感器尺寸与灵敏度的解耦设计。

在 5.1 节中，主要介绍了贴片天线的电流路径理论以及小型化原理，并以第三章中提出的矩形贴片天线湿度传感器与分形贴片天线传感器为基础提出了一种湿度增敏的小型化设计方法，通过模拟与实验对其进行初始谐振频率测试，比较了仿真与实验结果，结合第三章与第四章传感灵敏度的仿真与实验结果，分析得出了结论。

在 5.2 节中，介绍了贴片天线的孔洞位置理论，并基于孔洞位置理论完善了第三章中的边缘长度理论，结合电流路径理论，提出了贴片天线尺寸与湿度传感灵敏度的解耦设计原理；利用解耦设计理论，以小型化设计为目标，基于第三章的分形贴片天线传感器进一步提出了一种带有中部矩形孔洞的湿度退敏的小型化设计方法，并设计了三个中部矩形孔洞边长依次增加的 2 阶分形贴片天线，通过仿真和实验对其进行初始谐振频率测试以及湿度触感灵敏度测试，对比了仿真与实验结果，分析得出了结论。

5.1 湿度增敏的小型化设计方法

第三章中提出的分形贴片天线不仅可以提升矩形贴片天线湿度传感器的传感灵敏度并实现分形阶数控制传感灵敏度的可调节设计。在贴片天线传感器的小型化设计中，分形贴片天线也具有同样的优化作用，应用分形贴片天线可以使原矩形贴片天线的尺寸小型化，也可以利用分形阶数控制传感器的尺寸，实现传感器尺寸的可调节设计。本节将从理论、仿真与实验三个层面分析验证第三章中提出的湿度增敏的分形贴片天线小型化设计的应用原理以及设计方法。

5.1.1 电流路径理论与小型化原理

在设计贴片天线的过程中，往往是根据具体的应用场景制定具体的设计方案。应用场景需求决定的贴片天线的目标性能参数主要包括贴片天线的初始工作频率 f_0 以及贴片天线的尺寸大小等；当贴片天线在应用场景中作为传感单元时，贴片天线的传感灵敏度是重要的目标参数；在无线传输场景下，贴片天线的增益和方向性作为重要的性能参数，在设计时也应当予以充分的考虑。

对于本章所讨论的贴片天线湿度传感器，根据第三章 3.1.1 中该传感器的传感原理模型可知，该传感器在具体应用中存在小型化优化的设计需求。实际上，根据式 3.3 可知，在保证贴片天线工作频率不变的情况下，实现贴片天线小型化有具体两种思路：一是可以通过提升贴片天线的等效介电常数来减小天线的尺寸，如使用高介电常数的材料作为基板；二则是通过优化贴片天线的形状和结构，在减小实际天线实际尺寸时保证天线的有效长度不变，从而实现小型化。

本节将详细介绍贴片天线的电流路径理论与基于开洞方法的贴片天线小型化原理。

5.1.1.1 电流路径理论

对于一个典型的矩形贴片天线，其谐振频率由其尺寸、介电基板的介电常数以及介电基板的厚度决定，其谐振频率 f 可以通过以下式 5.1 计算。

$$f = \frac{c}{2L_{\text{eff}}\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5.1)$$

其中， c 是光速，大约是 3×10^8 米/秒， L_{eff} 是矩形贴片天线的有效长度， ϵ_r 是介电基板的相对介电常数。

当矩形贴片天线的辐射贴片的表面形状或结构发生变化（如开洞、边缘残缺或其他形状变化）时，由于辐射贴片表面的电流因为无法直接以最短的直线路径穿过形状不规则处而必须绕行流动，这种绕流效应增加了电流行走的总距离。从而使得电流路径长度变长了，由于电流路径长度变长，天线的有效长度

L_{eff} 也因此增加，两者的具体关系如式 5.2 所示。

$$L_{\text{eff}} \propto L_I \quad (5.2)$$

其中， L_I 为电流路径的长度。

由于矩形贴片天线表面形状的改变方式是无穷无尽的，故其辐射贴片表面电流路径长度的变化也是多样的，因此电流路径 L_I 没有一个具体的表达式。在这种情况下，以 $\Delta L (\Delta L > 0)$ 来表示电流路径长度变长导致的贴片天线有效长度的增加量，具体关系如下式 5.3 所示。

$$L_{\text{eff}} = L + \Delta L (\Delta L > 0) \quad (5.3)$$

其中， ΔL 由于电流路径的多样性，通常需要通过仿真或者实验来确定其具体值。天线有效长度的变化如图 5.1 所示，矩形贴片天线表面的所有的电流路线均为最短直线，其线段长度即为电流路径长度 L_I ，也等于其天线有效长度 L_{eff} ；但图中剩余两个带有孔洞的贴片天线，从其电流路线的分布可以看出，部分电流走过的路径总长是大于天线长度 L 的，故其电流路径长度应该是大于天线长度 L 的，天线有效长度 L_{eff} 也因此大于天线长度 L 。

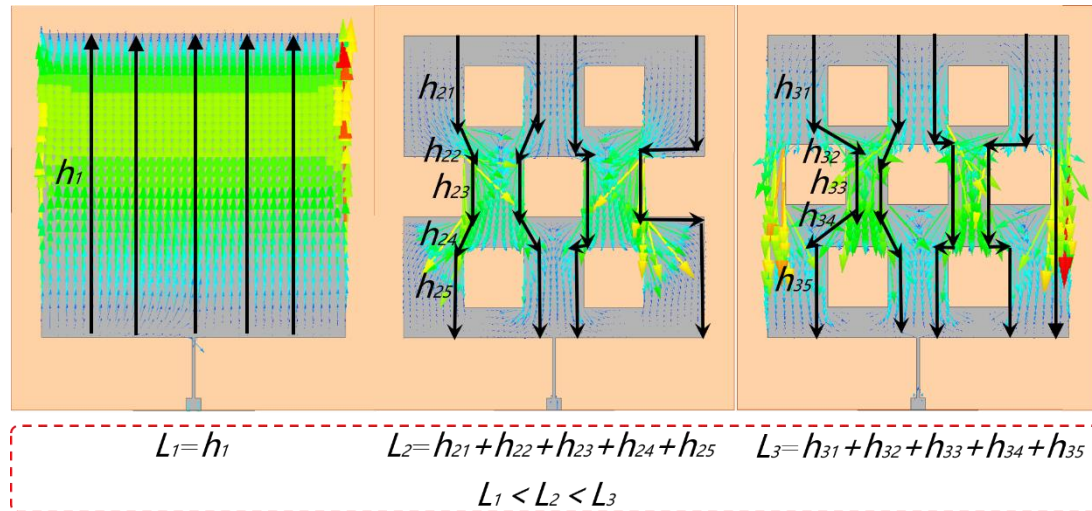


图 5.1 矩形贴片天线与开洞前后电流路线对比示意图

同时由图 5.1 中三种贴片天线各自的电流路线可知，贴片表面形状改变后的天线有效长度 L_{eff} 相对于天线长度 L 的增加量 ΔL ，是无法通过简单的理论计算得出具体数值的，只能通过有限元方法仿真计算或实验实测得到，为了方便后续有关天线有效长度 L_{eff} 与天线长度 L 的理论公式推导，定义变化系数 $k (k > 1)$ 来表示两者之间的关系，如式 5.4 所示。

$$L_{\text{eff}} = kL (k > 1) \quad (5.4)$$

由式 5.1、式 5.2 及式 5.3 可知，当矩形贴片天线辐射贴片的结构或表面形状发生变化时，由于贴片表面电流路径长度变长，天线的有效长度 L_{eff} 会增大，有效长度的增加会导致其谐振频率 f 降低。因此，可得出初步结论，对矩形贴片天

线贴片表面的形状做出适当的改变可以降低其谐振频率。

5.1.1.2 小型化原理

矩形贴片天线的设计一般是应用需求导向的，即在具体的通讯传感场景下，针对特定的传感或通讯频段，先确定一个固定的工作频率值 f_0 ，再根据天线性能、尺寸限制、成本以及其他具体应用需求选择适当的材料介电常数为固定值 ϵ_0 的介电基板，最后根据式 5.1 来计算确定矩形贴片的长度 L 以及根据阻抗匹配和辐射特性的要求确定天线的宽度 W 。

对式 5.1 做变形，将贴片天线的谐振频率定为设计目标值 f_0 ，则可得到贴片天线有效长度 L_{eff} 的设计计算表达式如式 5.5 下所示。

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5.5)$$

由电流路径理论可知，对矩形贴片天线贴片表面的形状结构做出适当的修改（开洞或修改边缘形状）可以降低其谐振频率，那么在保持修改后形状不变的情况下，以原来的工作频率 f_0 为目标设计频率，用式 5.5 可以计算得出谐振频率为 f_0 的该形状的贴片天线的理论有效长度 L'_{eff} 。

将理论有效长度的值作为参考值，以工作频率 f_0 为收敛目标，利用仿真和数值模拟手段迭代计算即可得到谐振频率为 f_0 的该形状贴片天线的天线长度 L ，该值应小于原来未修改形状的矩形贴片天线的天线长度值。因此，借由如图 5.2 所示的过程（其中 $f_0 = f_1 > f'_1$ 且 $L_0 = L_1 > L'_1$ ），矩形贴片天线的小型化设计得以实现。

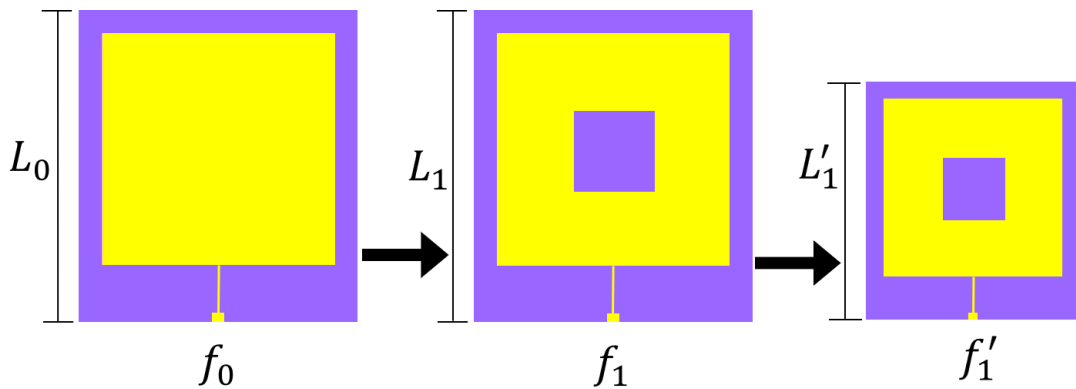


图 5.2 矩形贴片天线小型化原理示意图

5.1.2 传感器仿真分析

在本小节中，通过在 HFSS 高频仿真软件中对第三章 3.2.2 中的四种贴片天

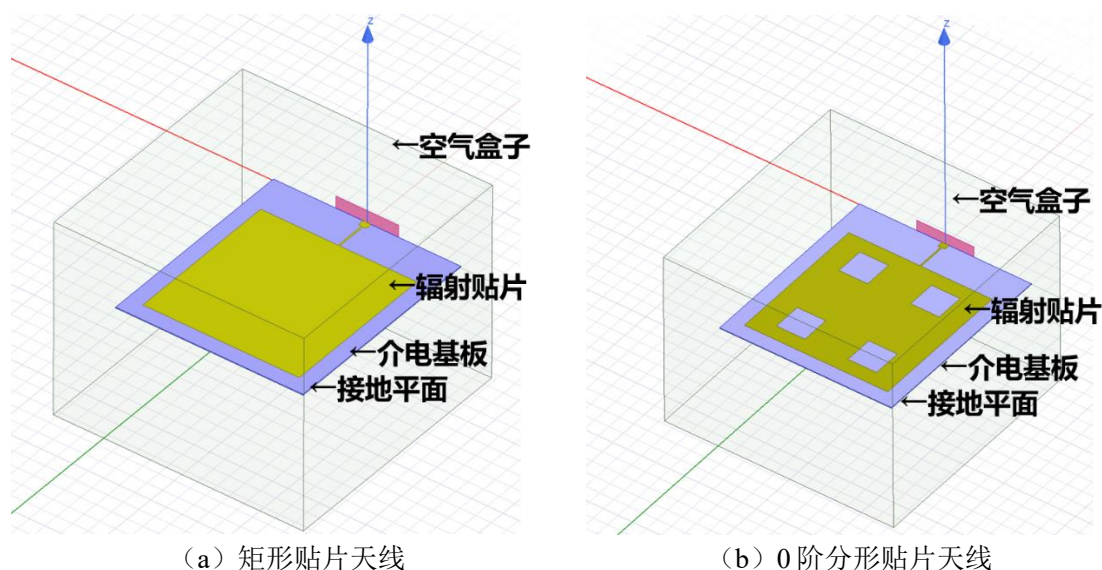
线进行建模，对其阻抗匹配进行了初始设计，确定了贴片天线工作时的最优化的参数，并对贴片天线的谐振频率进行了数值计算，对比了原矩形贴片天线与分形贴片天线的谐振频率变化情况，分析了分形贴片天线分形阶数与谐振频率变化的关系，初步验证了贴片天线的小型化原理与利用分形贴片天线进行小型化这一方案的可行性。

5.1.2.1 HFSS 建模

在 HFSS 高频仿真软件中建立如下图 5.3 所示的四种贴片天线的电磁仿真模型。在该类模型中，所有的尺寸信息与第三章 3.2.2 中的设计方案一致，四种贴片天线的基板材料均采用 RT5880 高频压合板，其介电常数为 2.2 且保证仿真中环境温度恒定，对基板介电常数与覆铜尺寸没有影响。所有天线整体均采用平面波馈电，为了模拟无限远处的天线辐射效应，设置边界为 PML 辐射吸收边界，降低算力需求；由于金属作为良性导体，平面波的趋肤深度很低，天线的上辐射贴片、节点平面在仿真中采用无厚度平面，并将边界设置为完美电壁（Perfect E）来对良性导体平面进行模拟。

矩形贴片天线的 S11 曲线如图 5.4 所示。由图可知，在初始状态下，矩形贴片天线的谐振频率约为 1.95GHz，且谐振频率处的 S11 下降了 20GHz 左右，较好地区分了谐振段和非谐振段，基本满足了传感器设计要求。

四种贴片天线在各自的工作频率时可以通过软件导出天线此时的电流分布图如图 5.5 所示。



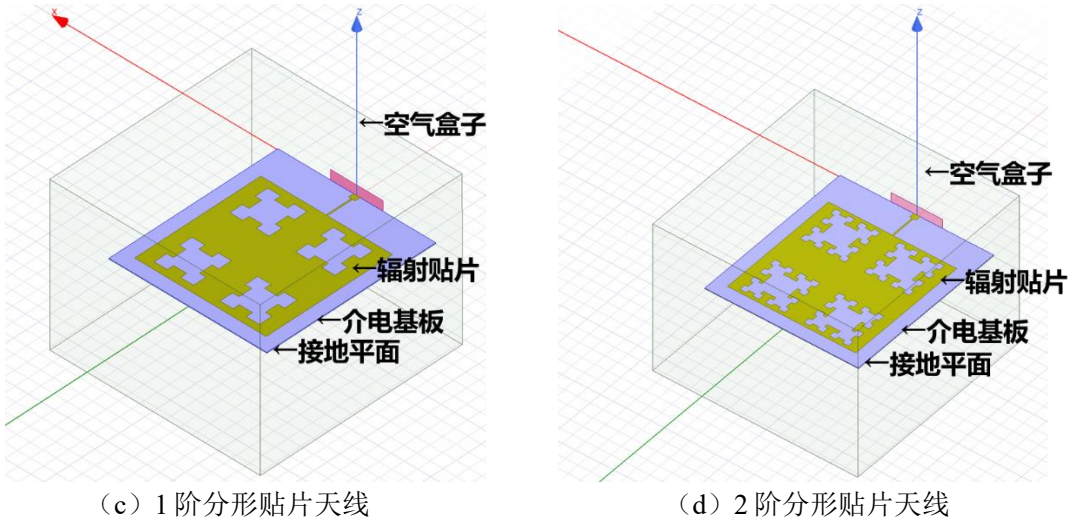


图 5.3 HFSS 中贴片天线模型图

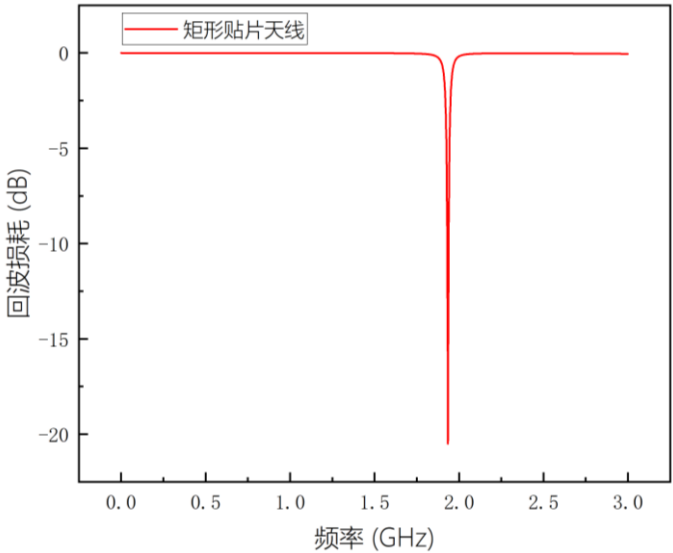
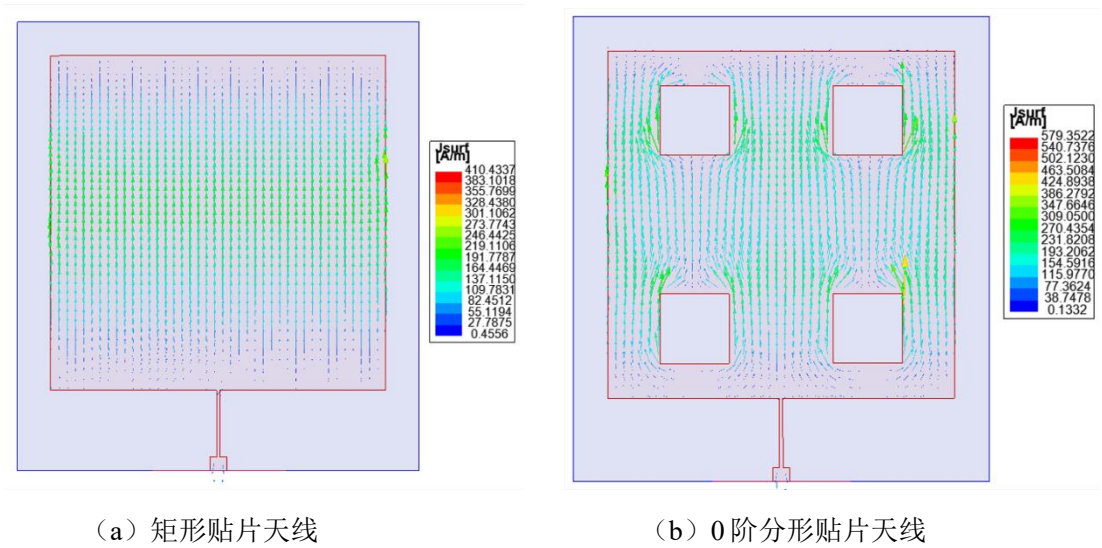


图 5.4 仿真中矩形贴片天线初始状态 S11 曲线图



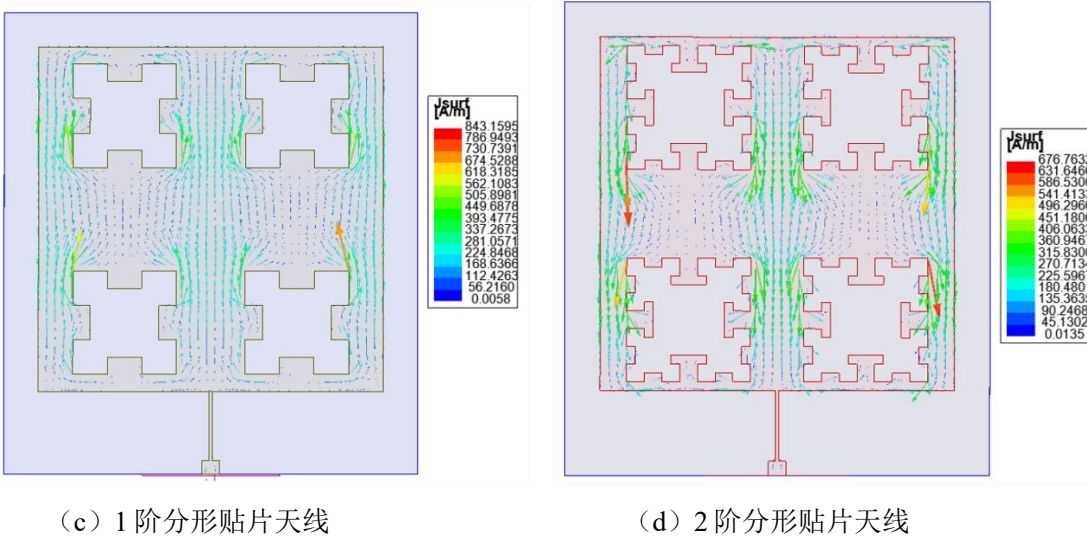


图 5.5 仿真中贴片天线初始状态电流分布图

贴片天线的电流分布图可以较为直观地体现电流的分布与电流路径情况，由上图可知，分形贴片天线的电流路径长度明显大于矩形贴片天线的电流路径长度；且随着分形阶数的增加，分形图案边缘形状的复杂程度也在提升，电流路径的长度也因此在不断增大。

5.1.2.2 模拟结果

根据仿真计算得到的四种贴片天线的 S_{11} 曲线，可以从中提取他们的初始谐振频率信息如表 5.1 所示。

其中，为了简化表达并且便于后续的数据分析与绘图，在本文中规定原矩形贴片天线的分形阶数为-1，后续在各图表中出现分形阶数为-1 的天线均视为矩形贴片天线。

表 5.1 仿真计算所得的各贴片天线的初始谐振频率

天线分形阶数 n	-1	0	1	2
初始谐振频率 f_0 (GHz)	1.94	1.909	1.743	1.601

根据表 5.1 中的四种贴片天线的初始谐振频率信息可以得到分形阶数与分形贴片天线初始谐振频率的关系如图 5.6 所示。

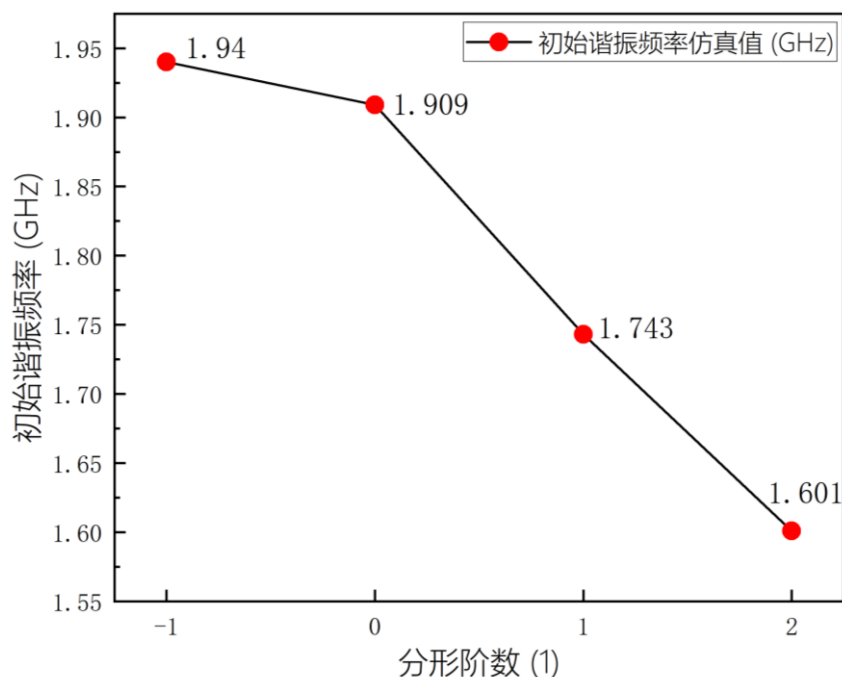


图 5.6 仿真中分形阶数与贴片天线初始谐振频率关系图

由图 5.6 可知, 分形贴片天线的初始谐振频率小于矩形贴片天线, 且随着分形阶数的提升, 分形贴片天线的初始谐振频率持续降低。

结合贴片天线的电流分布图中电流路径长度随着分形阶数提升而增大的现象, 图 5.6 的结果从仿真层面论证了电流路径理论的正确性, 即辐射贴片上电流路径的增大会降低贴片天线的谐振频率; 且根据贴片天线的小型化原理, 图 5.6 的结果也从仿真层面验证了分形贴片天线传感器小型化方案的可行性。

5.1.3 实验验证与结果讨论

在本实验中, 直接使用第四章 4.3.1 中委托加工得到的矩形贴片天线和三个分形阶数依次增加的分形贴片天线, 利用矢量网分析仪通过同轴线有线测试的方法, 测得了这四种天线的谐振频率。对比了实验测试结果与 3.4.1 中的仿真结果, 验证了仿真结果与理论假设。

5.1.3.1 实验设计

选用第四章 4.3.1 中图 4.8 所示加工得到的四种贴片天线, 利用矢量网络分析仪及同轴线的有线连接, 依次对四种贴片天线的 S11 图像进行测试, 如图 5.7 所示。由于环境噪声以及有线传输带来的随机误差, 测试时应等待 S11 图像不再发生扰动后再记录天线的 S11 图像信息, 并依次保存四种贴片天线的雷 S11 曲线数据, 保存的数据为 0-3GHz 中均匀分布的有限个带有回波损耗信息的频率点, 可以将这些频率点通过软件再次绘制出贴片天线的 S11 曲线如图 5.8 所示。

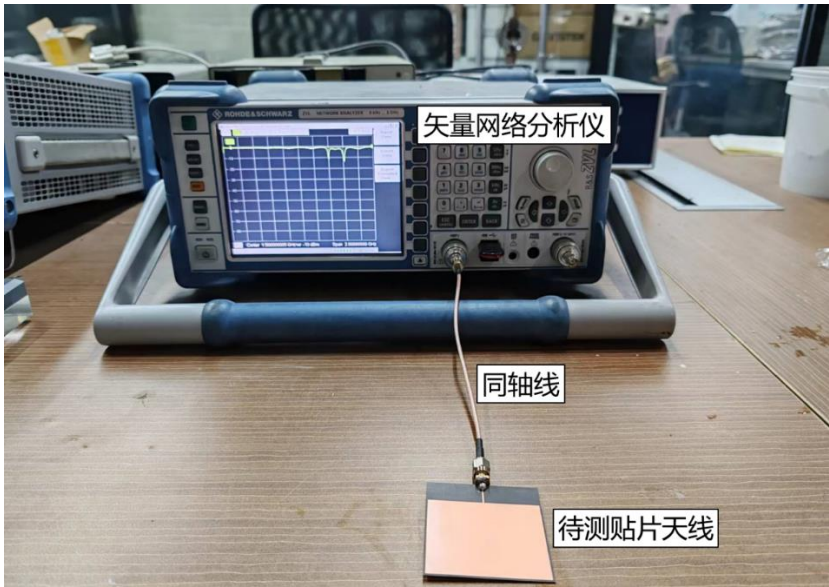


图 5.7 利用矢量网络分析仪有线测试贴片天线 S11 图像

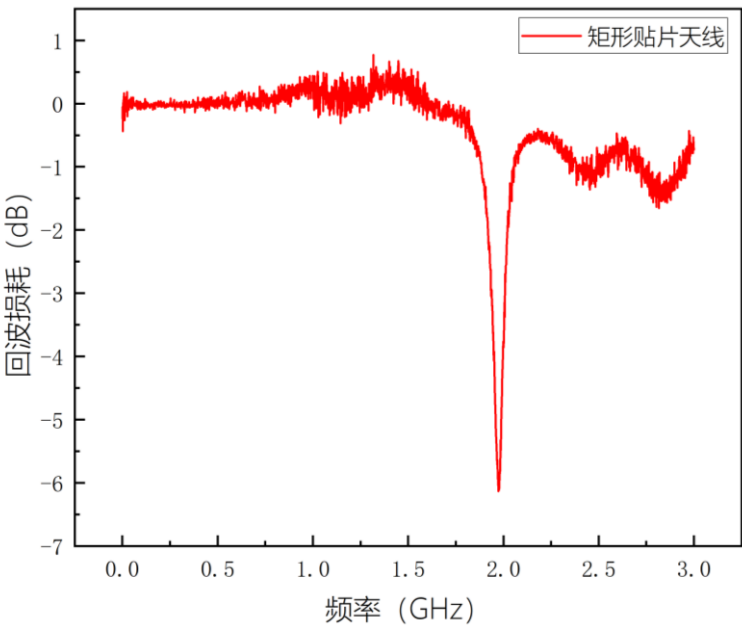


图 5.8 利用矩形贴片天线的实测数据绘制得到的 S11 曲线图

5.1.3.2 实验数据分析

从四种贴片天线 S11 曲线的数据中提取四种贴片天线的谐振频率如下表 5.2 所示（其中矩形贴片天线的分形阶数为-1）。

表 5.2 实验实测所得的各贴片天线的初始谐振频率

天线分形阶数 n	-1	0	1	2
初始谐振频率 f_0 (GHz)	1.953	1.936	1.774	1.647

根据表 5.2 的数据信息，可以绘制分形贴片天线分形阶数与其初始谐振频率

的关系图如图 5.9 所示。

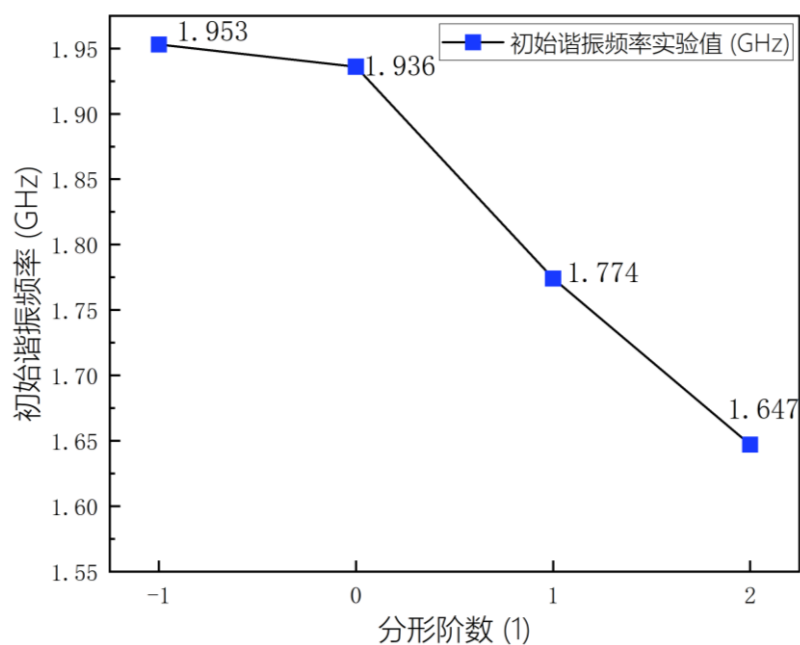


图 5.9 实验测得的分形阶数与贴片天线初始谐振频率关系图

由图 5.9 可知，通过实验测试，分形贴片天线的初始谐振频率小于矩形贴片天线，且随着分形阶数的提升，分形贴片天线的初始谐振频率持续降低。

5.1.3.3 实验结果讨论

为便于比较分析，将本节中模拟得到的四种贴片天线初始谐振频率数据与本节中实验测得的四种贴片天线初始谐振频率数据按照分形阶数的依次增加的规律绘制在同一张关系图中，如图 5.10 所示（矩形贴片天线的分形阶数视为-1）。

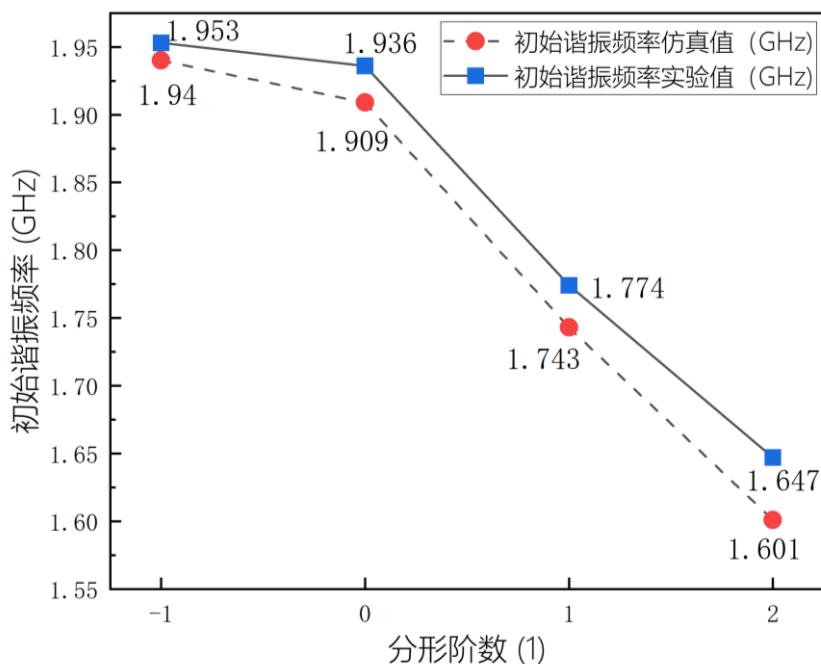


图 5.10 四种贴片天线初始谐振频率仿真值与实验值对比图

由图 5.10 可知, 每种贴片天线初始谐振频率的仿真值与实验值基本一致, 以理论模型下的仿真计算值为基准, 每种贴片天线的实验值的相对误差均在 5% 以内。所有贴片天线初始谐振频率的实验值均低于仿真值的原因可能是仿真模型中的辐射边界的范围小于实际实验情况所致, 但由于实际的辐射边界是无限远处, 故此系统误差可以通过在仿真中不断增大辐射边界被逐渐减小, 使谐振频率的仿真值无限逼近实测值, 达到等效效果, 但本身无法完全消除。

随着分形阶数的增加, 分形贴片天线的初始谐振频率在仿真与实验中均一致保持降低趋势 (0 阶分形贴片天线的初始谐振频率在仿真和实验中也都小于原矩形贴片天线的初始谐振频率)。实验结果与仿真结果的一致, 不仅验证了仿真的合理性, 也在仿真初步验证理论假设的基础上, 进一步以实际实验证明了本节 5.1.1 中电流路径理论的正确性与分形贴片天线小型化设计方案的可行性。

将本节中的仿真与实验分析结果与第四章中分形贴片天线湿度传感灵敏度的仿真与实验结果对比可知, 分形阶数控制的分形贴片天线传感器的小型化与增敏设计是同步的, 即分形阶数增加时, 分形贴片天线湿度传感器的初始谐振频率与传感灵敏度会同时下降与提升, 即分形阶数控制的小型化与增敏设计方法中, 天线尺寸与传感灵敏度是耦合且同步变化的。

5.2 湿度退敏的小型化设计方法

第三章中针对矩形贴片天线湿度传感器提出的湿度增敏小型化优化设计方

法,是一种通过在矩形贴片天线的上辐射贴片挖去分形图案的孔洞而实现的,且通过调节类闵可夫斯基 X 分形图案分形阶数,可以实现分形贴片天线的初始谐振频率与湿度传感灵敏度的同步升高或降低。

在这种设计方法中,由于分形阶数同时对天线的电流路径与有效边缘长度起控制作用,以这种方法在设计分形贴片天线传感器时,贴片天线的设计尺寸与传感灵敏度将会高度耦合。因此,天线传感灵敏度的调整总是伴随着初始谐振频率的变化。

在实际应用中,由谐振频率变化所决定的灵敏度对检测的准确性和可读性至关重要。并且在特定的应用场景下对传感器的尺寸也有确切的要求。因此,将天线尺寸与灵敏度解耦是十分重要的,采用尺寸与灵敏度解耦设计的贴片天线湿度传感器,能够有效在湿度检测与无线通讯之间找到平衡,既能使设计满足天线通讯性能的要求,也能够使天线作为传感单元满足传感灵敏度的要求。

同时解耦设计对于本文提出的分形贴片天线的小型化设计有重要意义,当分形阶数提升到边界值时,分形阶数将不会再对天线的初始谐振频率以及传感灵敏度起到明显作用,此时借助解耦设计方法,可以使分形贴片天线再传感灵敏度基本不变的情况,初始谐振频率继续下降,从而实现湿度退敏的贴片天线传感器小型化设计。

本节提出了一种带有中部矩形孔洞的分形贴片天线,通过控制中部矩形孔洞的边长与分形孔洞的分形阶数,可以实现贴片天线传感器的尺寸与传感灵敏度的解耦设计,同时在分形阶数较高的情况下,通过增加中部矩形孔洞的边长,可以使分形贴片天线传感器的尺寸继续减小,实现湿度退敏的小型化设计。

5.2.1 孔洞位置理论与解耦设计原理

由第三章中提出的边缘长度理论可知,辐射贴片表面上边缘长度较大的位置,贴片天线感知环境湿度模型中穿过介质后再回到接地平面的电场线数量相对于边缘长度较小的位置以及辐射贴片的中部位置更多,上覆介质湿度变化引起的介电常数的变化对整个传感模型的等效介电常数的影响也因此变大,天线的谐振频率变化范围也因此变大,由此可以通过增加矩形贴片的边缘长度来实现贴片天线湿度感知灵敏度的提升。

在本小节中,对于贴片天线湿度传感模型的传感灵敏度引入了一个新的概念,即穿过贴片天线上覆介质的电场线的上探深度。孔洞位置理论表明贴片天线辐射贴片上孔洞的位置会影响孔洞周围穿过上覆介质的电场线的上探深度,电场线在上覆介质中的上探深度越大,则上覆介质介电常数的影响越强,从而贴片天线传感器的湿度感知灵敏度越强。该理论完善了第三章中的边缘长度理

论，通过同时考虑穿过上覆介质的电场线的数量与穿过上覆介质电场线的上探深度两个因素完善了辐射贴片表面形状变化对贴片天线传感灵敏度的影响理论。

5.2.1.1 孔洞位置理论

Bansevicius 等^[109]探讨了平行板电容器中圆形孔洞内电场的分布情况，研究者指出对于平行板电容器，电容器两端边缘部分与正中部孔洞边缘部分的电场线分布是不同的，如图 5.11 所示。其中两端边缘部分的电场线的影响范围更大，闭合长度也更大；但是正中部孔洞边缘的电场线由于耦合相消，其影响范围较小，闭合长度也更小。

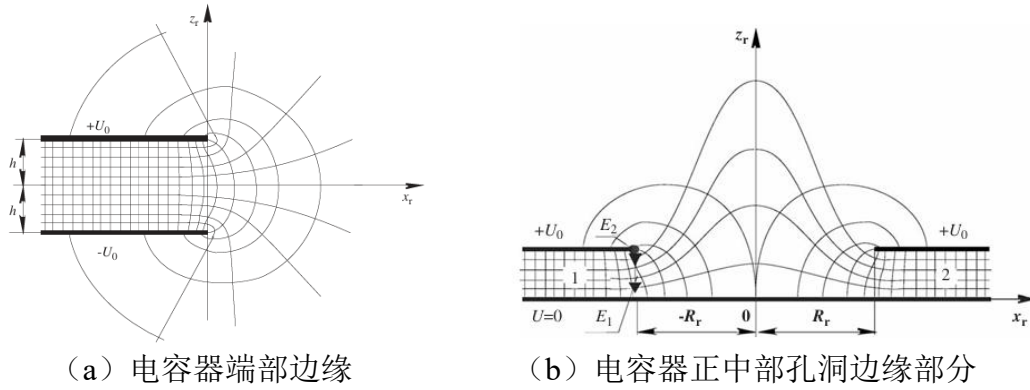


图 5.11 正中部带有孔洞的平行板电容器电场线分布示意图^[109]

在贴片天线湿度传感模型中，贴片天线的上辐射贴片与接地平面以及中部的介质基板同样可以看做是平行板电容，故同样符合上述电场线分布规律。由此提出孔洞位置理论如下。

直接影响贴片天线湿度传感器传感灵敏度的因素除了从辐射贴片出发的穿过上覆介质的电场线的数量外，还有该类电场线的上探深度，穿过上覆介质的电场线的上探深度越大，则上覆介质介电常数的影响越强，贴片天线湿度传感器的传感灵敏度也就越高，如下式 5.6 所示。其中 S 为贴片天线湿度传感器的传感灵敏度， h_e 为辐射贴片上穿过上覆介质的电场线在上覆介质中的上探深度。

$$S \propto h_e \quad (5.6)$$

其中 S 为贴片天线湿度传感器的传感灵敏度， h_e 为辐射贴片上穿过上覆介质的电场线在上覆介质中的上探深度。

位于贴片天线表面辐射贴片中部位置的孔洞，孔洞边缘的电场线影响范围较小，闭合长度小，故电场线上探深度也较小；而位于辐射贴片边缘位置的孔洞，孔洞边缘的电场线影响范围较大，闭合长度大，电场线的上探深度相对于中部位置的孔洞更大。

在辐射贴片的边缘位置开洞，电场线的耦合相消效应微弱，会使得穿过上覆介质的电场线数量相对未开洞时增加，且电场线的上探深度都较大，此时的

孔洞适用边缘长度理论，增大其边缘长度会提升贴片天线的传感灵敏度。

如果开洞位置由边缘逐渐向贴片中部移动，则随着电场线耦合相消效应的增强，会使得穿过上覆介质的电场线数量相对孔洞位于边缘位置时逐渐减少且越来越接近未开洞时穿过上覆介质电场线的数量，即电场线数量对上覆介质介电常数影响的增强效应逐渐减弱，同时，电场线的上探深度也会逐渐减小，即电场线上探深度对上覆介质介电常数影响的削弱效应也在逐渐增强；在孔洞位置逐渐向中部移动的过程中，会到达一个介于贴片正中部与边缘的临界位置，此时在此处开洞，其穿过上覆介质的电场线数量增加对上覆介质介电常数影响的增强效应与电场线的上探深度减小对上覆介质介电常数影响的削弱效应完全相等时，两者同叠加相消，导致此时上覆介质对贴片天线等效介电常数的影响与没有开洞的矩形贴片上部的电场分布造成的影响效果是相同的，即在此处开洞增加贴片天线的边缘长度，不会再提升贴片天线的传感灵敏度。

当孔洞越过此临界位置持续向辐射贴片的正中部移动时，此时孔洞边缘穿过上覆介质的电场线的上探深度相比其数量已经开始占主导影响，上覆介质介电常数的影响相比无孔洞的情况更加微弱，故临界位置向内的所有孔洞，不在适用于边缘长度效应，因为此时的孔洞的存在虽然增加了贴片天线的边缘长度，但是中部孔洞边缘长度的增加反而会使贴片天线传感器的传感灵敏度降低。

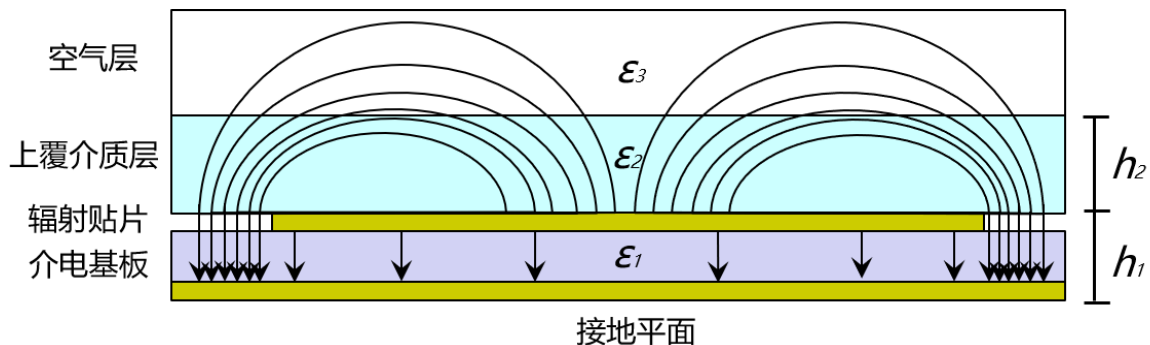
孔洞位置位于正中部时，由于对称造成电场线完全的耦合相消，孔洞边缘穿过上覆介质的电场线数量相比不开洞时基本没有变化，但穿过介质的电场线的上探深度明显减小，从而导致传感灵敏度下降，小于不开洞的矩形贴片天线。

总结上述过程可以得出，贴片天线的传感灵敏度的变化率随着孔洞位置的内移而逐渐降低，且经过临界位置后，会由正值变为负值，如式 5.7 所示。

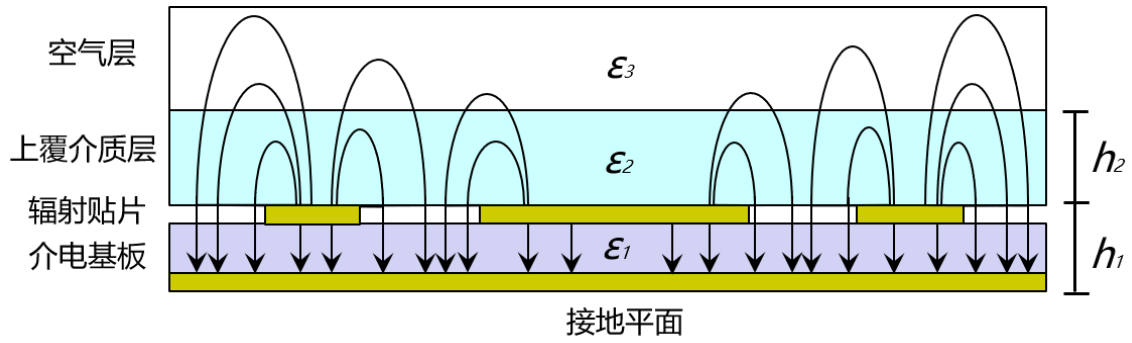
$$S' \propto \frac{1}{d_m} \quad (5.7)$$

其中 d_m 为孔洞与辐射贴片中心的距离， S' 贴片天线湿度传感器的传感灵敏度随 d_m 变化时的变化率，当孔洞到达临界位置时， $S' = 0$ 。

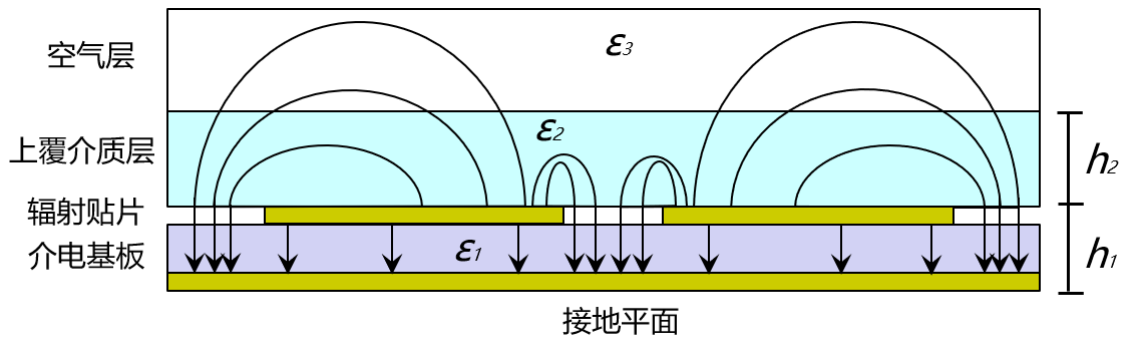
上述孔洞位置理论的具体等效示意模型由图 5.12 及图 5.13 所示。



(a) 未开洞矩形贴片天线



(b) 带有边缘孔洞的矩形贴片天线



(c) 带有正中部孔洞的矩形贴片天线

图 5.12 三种开洞情况下的矩形贴片天线湿度传感模型电场线分布示意图

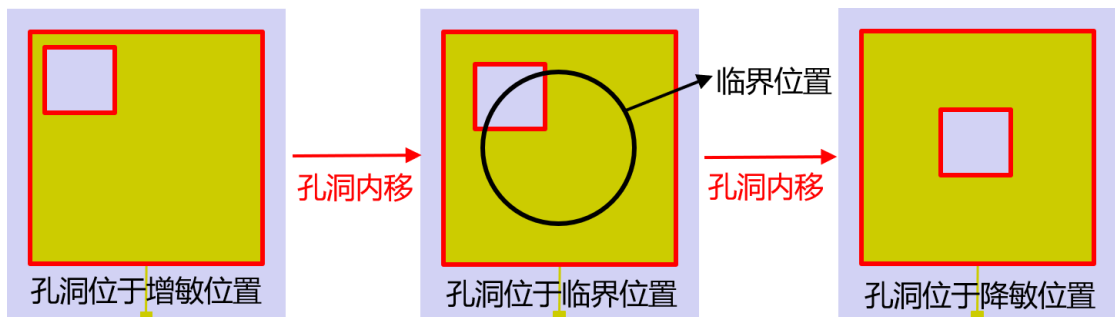


图 5.13 孔洞位置变化对贴片天线传感器传感灵敏度的影响示意图

由孔洞位置理论可以得出结论，当孔洞位置靠贴片边缘时，贴片天线传感器的传感灵敏度相比原矩形贴片是提升的，且该孔洞适用于第三章中的边缘长度理论，即增加该孔洞的边缘长度，可以继续提升传感灵敏度；当孔洞位置接近甚至位于贴片的正中部时，贴片天线的传感灵敏度相比原矩形贴片是下降的，该孔洞不再适用第三章中的边缘长度理论，甚至增加该孔洞的边缘长度会降低贴片天线传感器的传感灵敏度。

5.2.1.2 解耦设计原理

由本章 5.1.1 中的电流路径理论可知，不论孔洞位置位于何处，只要在辐射

贴片表面开洞，其表面电流的电流路径就会增大，从而降低贴片天线的谐振频率，进而可以根据小型化原理缩减贴片天线的尺寸。

同时根据本节提出的孔洞位置理论可知，位于中间位置的孔洞会降低贴片天线传感器的传感灵敏度，而位于边缘位置的孔洞会提升传感灵敏度；同时根据完善后的边缘长度理论，可知边缘位置孔洞的边缘长度增加会继续提升传感灵敏度，而中间位置孔洞的边缘长度增加会继续降低传感灵敏度。

根据以上原理可以提出一种贴片天线湿度传感器尺寸与传感灵敏度解耦的设计方法。在设计贴片天线时，在其边缘部分与中间部分同时布置边缘长度可调节的孔洞，规定边缘孔洞的边缘长度为 l_e ，中部孔洞的边缘长度为 l_m ，在 l_e 与 l_m 的合理变化的边界范围内，对与设计尺寸直接相关的贴片天线初始谐振频率，可以通过分别调节 l_e 与 l_m 的值使贴片天线的初始谐振频率以满足设计值，且由于有两个影响参数，故在非边界情况下，满足要求的解并不唯一；同时由于 l_e 的增加会提升传感灵敏度而 l_m 的提升会降低传感灵敏度，故在满足初始谐振频率设计值的 l_e 与 l_m 的解集中，可以进一步选择出满足传感灵敏度要求的 l_e 与 l_m 的解（超越设计极限的情况除外）。该种基于孔洞边缘长度控制的设计方法可用式 5.8 及式 5.9 表示。

$$f_0 = F_1(l_m, l_e) \quad (5.8)$$

$$S = F_2(l_m, l_e) \quad (5.9)$$

其中 F_1 与 F_2 分别表示 l_m ， l_e 与贴片天线初始谐振频率 f_0 以及传感灵敏度 S 的函数关系。

该设计方法通过引入边缘孔洞边缘长度 l_e 与中部孔洞边缘长度 l_m 这两个互不相关的自由变量以及他们与贴片天线初始谐振频率 f_0 和传感灵敏度 S 的两种互相独立的函数关系 F_1 与 F_2 ，可以在 l_m 与 l_e 变化的边界范围内实现贴片天线初始谐振频率与天线传感灵敏度的解耦设计。

5.2.2 传感器选型与设计方案

为了验证解耦设计的可行性，计划通过对一组能够验证孔洞位置理论的贴片天线传感器进行仿真测试与实验验证。

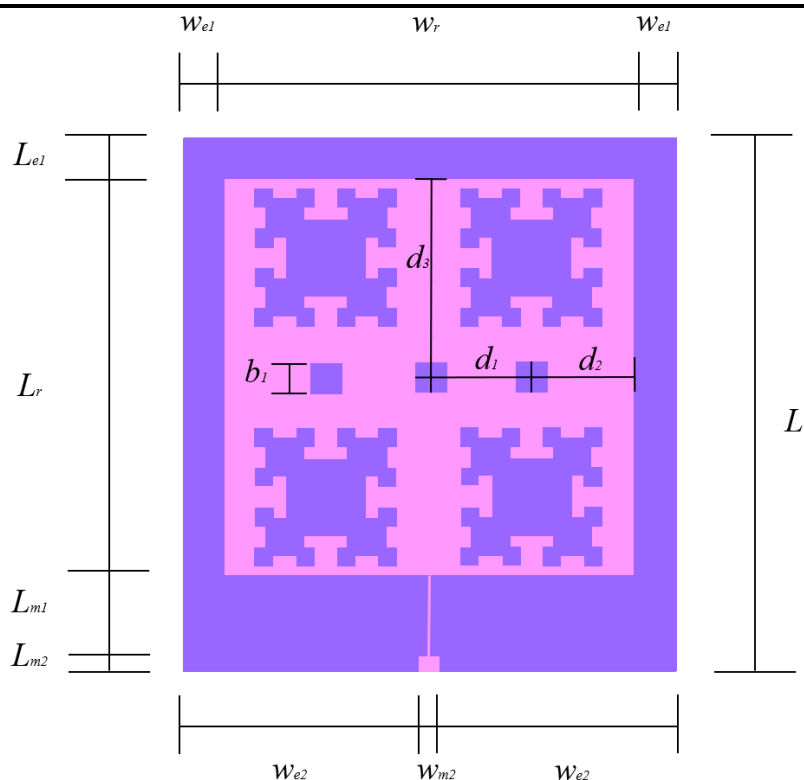
由于第三章提出的类闵可夫斯基 X 分形贴片天线的仿真与实验结果已经可以充分验证矩形贴片天线边缘孔洞的边缘长度增大会提升其传感灵敏度。故只要在该分形贴片天线的设计基础上在辐射贴片的中部位置设置边缘长度逐渐增加的中部孔洞，通过仿真、实验测试其传感灵敏度是否随着中部孔洞的引入以及其边缘长度的增加在逐渐降低即可完整验证孔洞位置理论的正确性；在此基础上，对其初始谐振频率进行仿真与实验测试，如果谐振频率随着中部孔洞边

缘长度的增加而逐渐降低，则可初步验证 5.2.1 中解耦设计原理的正确性和解耦设计方法的可行性以及分形贴片天线传感器湿度退敏小型化设计的可能性。

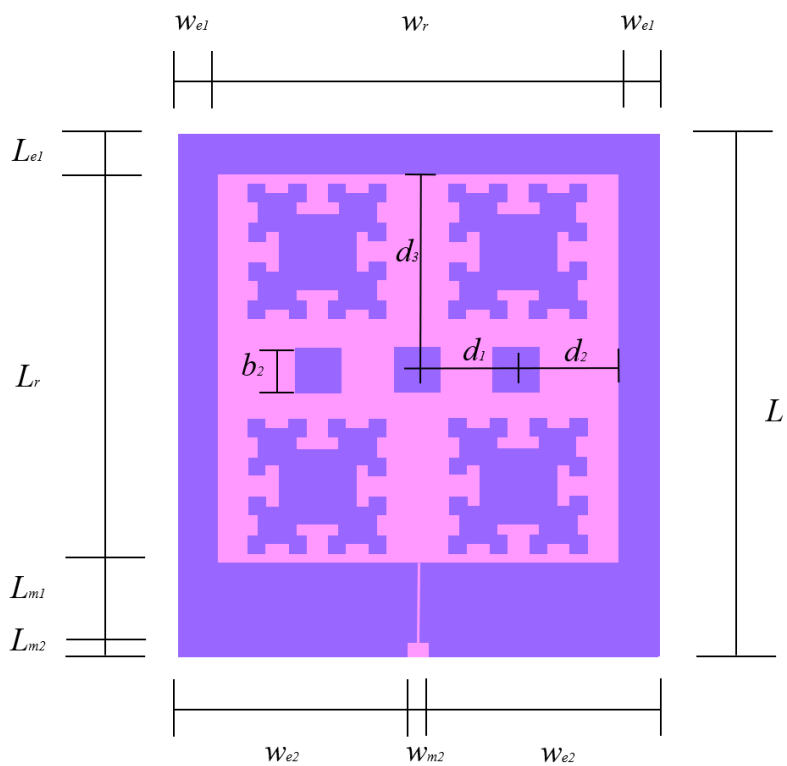
根据上述传感器选型设计思路，决定选择第三章中的 2 阶分形贴片天线作为对照，在 2 阶分形贴片天线的基础上，在辐射贴片的中部位置添加三个边长为 b 的矩形孔洞并设计三种边长 b 线性增加的解耦设计天线，分别命名为小孔 2 阶分形贴片天线（矩形孔洞边长 $b_1 = 4\text{mm}$ ），中孔 2 阶分形贴片天线（矩形孔洞边长 $b_2 = 6\text{mm}$ ）与大孔 2 阶分形贴片天线（矩形孔洞边长 $b_3 = 8\text{mm}$ ），这些带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线传感器的具体尺寸信息如图 5.14 及表 5.3 所示。为保持与第三章中 2 阶分形贴片的一致性，本章中设计的三种带有部孔洞的 2 阶分形贴片天线同样采用温度不敏感的 RT5880 高频压合板（基板介电常数为 2.2），基板厚度也与第三章的贴片天线相同，为 0.254mm ，且辐射贴片与接地平面都采用覆铜方式设计。

表 5.3 带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线具体尺寸参数信息表

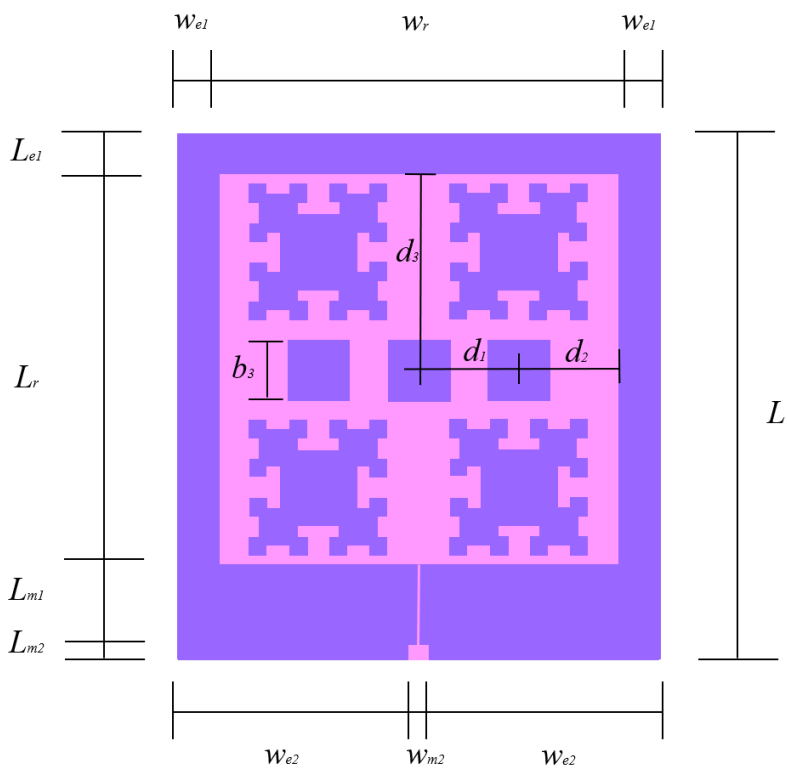
参数名称	W	W_r	L	L_r	W_{e1}	W_{e2}
设计值 (mm)	60	50	67	50	17.5	28.75
参数名称	W_{m2}	L_{e1}	L_{m1}	L_{m2}	d_1	d_2
设计值 (mm)	2.5	5	10	2	7.5	5
参数名称	b_1	b_2	b_3	d_1	d_2	d_3
设计值 (mm)	4	6	8	12.5	12.5	25



(a) 小孔 2 阶分形贴片天线 ($b_1 = 4mm$)



(b) 中孔 2 阶分形贴片天线 ($b_2 = 6mm$)



(c) 大孔 2 阶分形贴片天线 ($b_3 = 8mm$)

图 5.14 带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线设计尺寸示意图

由电流路径理论和孔洞位置理论可以推测，在该解耦设计方法中，相比于原 2 阶分形贴片天线，带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的初始谐振频率更小，且传感灵敏度也会降低。同时对于带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线，其初始谐振频率和湿度感知灵敏度均会随着中部孔洞边长的增加而持续降低。

后续的仿真与实验会依次验证这些理论假设的正确性以及该解耦设计方法的可行性。

5.2.3 传感器仿真分析

在本小节中，通过在 HFSS 高频仿真软件中对本章 5.2 中的三种带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线进行建模设计，并对其初始谐振频率进行了数值计算，将其与原 2 阶分形贴片天线的仿真结果进行对比，分析了中部孔洞边长与初始谐振频率变化的关系；并在此基础上在天线模型上部添加了上覆介质模块以及引入了介电常数变化参数来模拟贴片天线传感器监测水泥凝结时间的过程，根据仿真结果计算得出了三种贴片天线的传感灵敏度，通过将其与原 2 阶分形贴片天线传感器的仿真结果进行比较，分析了中部孔洞边长与传感灵敏度变化的关系。通过上述仿真测试，初步验证了孔洞位置理论与解耦设计原理的正确性和解耦设计方法的可行性以及分形贴片天线传感器湿度退敏小型化设计的可能性。

5.2.3.1 HFSS 建模

对于贴片天线初始谐振频率测试仿真模型，具体建模方法如下：

与第四章中的建模方式相同，在已建立的 2 阶分形贴片天线模型的基础上，在辐射贴片上添加中部孔洞即可得到如图 5.15 所示的三种带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的电磁仿真模型。该模型中所有的尺寸信息与本章 5.2.2 中的设计方案一致，仿真中的基板材料、环境温度以及馈电方式和边界条件均与本章 5.1.2 中的仿真模型一致。基板材料均采用 RT5880 高频压合板，其介电常数为 2.2 且保证仿真中环境温度恒定，对基板介电常数与覆铜尺寸没有影响。所有天线整体均采用平面波馈电，为了模拟无限远处的天线辐射效应，设置边界为 PML 辐射吸收边界，降低算力需求；由于金属作为良性导体，平面波的趋肤深度很低，天线的上辐射贴片、节点平面在仿真中采用无厚度平面，并将边界设置为完美电壁（Perfect E）来对良性导体平面进行模拟。

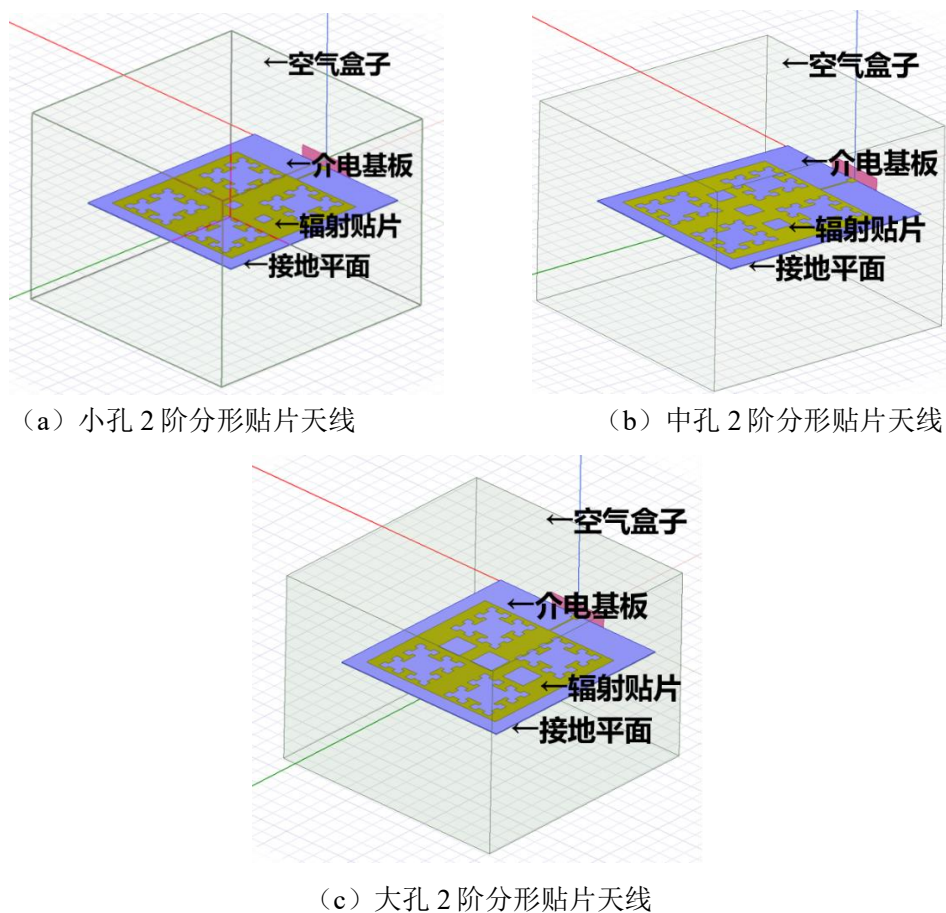
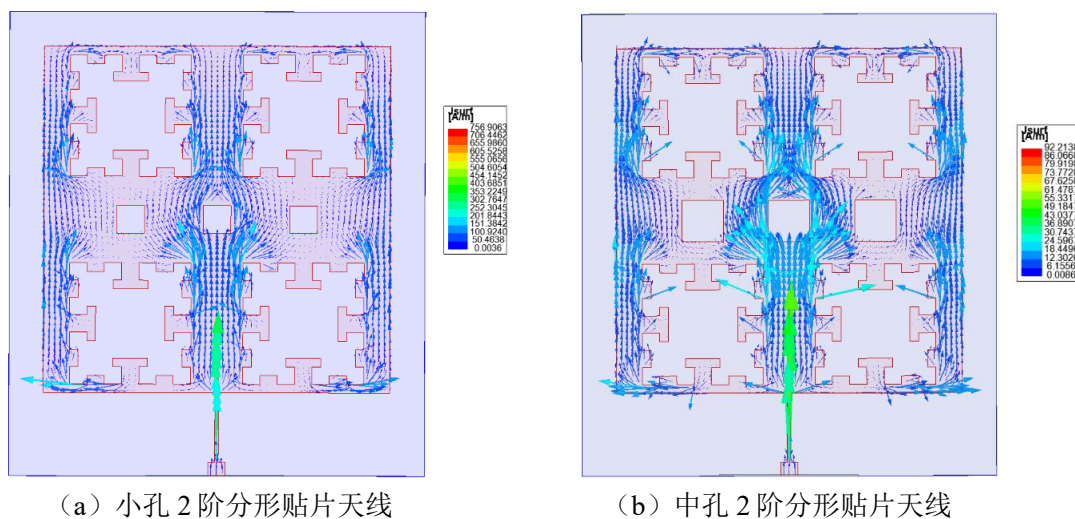
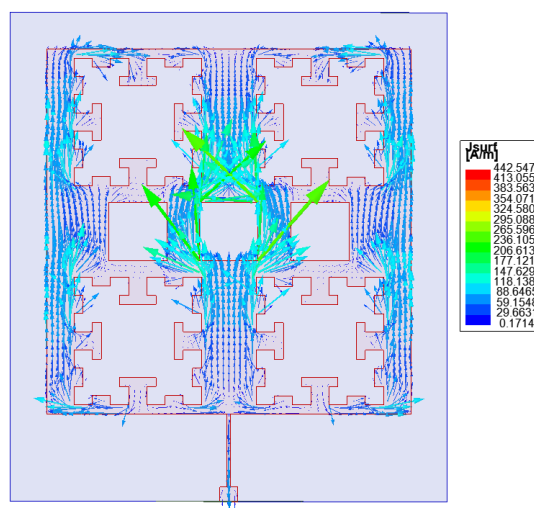


图 5.15 HFSS 中带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的模型图

三种贴片天线在各自的工作频率时可以导出其电流分布图如图 5.16 所示。





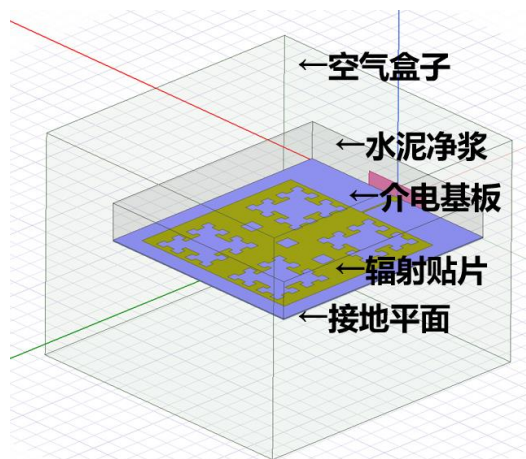
(c) 大孔 2 阶分形贴片天线

图 5.16 仿真中带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线初始状态电流分布图

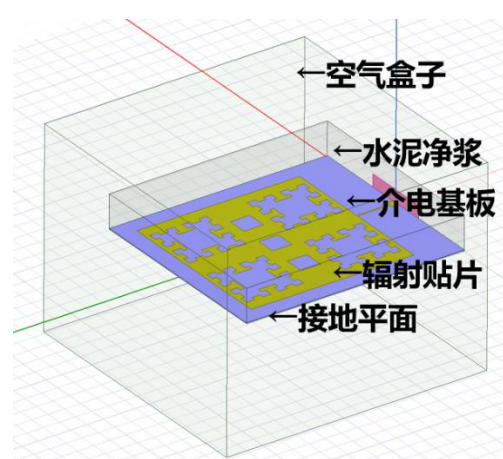
由上图可知，对比本章 5.1.2 中的 2 阶分形贴片天线的电流图，带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的电流路径长度明显大于原 2 阶分形贴片天线；且随着中部孔洞边长的增加，电流路径的长度也因此在不断增大。

对于贴片天线监测水泥凝结时间仿真模型，具体建模方法如下：

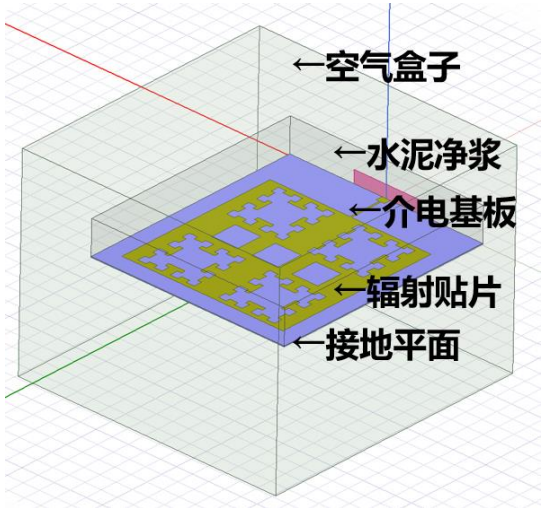
在本节谐振频率测试仿真中三个天线模型的基础上，于辐射贴片上部添加增加一层厚度为 10mm 的等效水泥净浆层模块，由此建立孔洞天线监测水凝结时间监测的仿真模型如图 5.17 所示。设置该水泥净浆层的介电常数为变化参数进行遍历计算用于模拟凝结过程以及计算传感灵敏度，除此之外，的所有参数信息以及边界条件设置都与谐振频率测试仿真中完全一致。



(a) 小孔 2 阶分形贴片天线



(b) 中孔 2 阶分形贴片天线



(c) 大孔 2 阶分形贴片天线

图 5.17 HFSS 中带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线检测水泥凝结时间模型图

HFSS 模型中天线传感器各部分的相对介电常数如下表 5.4 所示，其中 ϵ_1 为基板介电常数， ϵ_2 为上覆水泥净浆的介电常数（湿度最高的初始状态为 16，凝结结束后的干燥状态为 4）， ϵ_3 为空气的介电常数。

表 5.4 HFSS 仿真模型中天线传感器各部分的相对介电常数

参数名称	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
相对介电常数	2.2	16-4	1

可以根据仿真中参数遍历计算得出三种贴片天线监测水泥凝结时间过程的 S11 曲线数据，提取出他们各自在覆介质介电常数变化时的谐振频率信息，运用数据通过灵敏度公式计算便可以得出三种天线各自的传感灵敏度。

5.2.3.2 模拟结果

对于 5.2.3.1 中天线初始谐振频率测试的仿真结果，根据仿真计算得到的三种贴片天线的 S11 曲线，可以从中提取他们的初始谐振频率信息如表 5.5 所示。为了便于理论验证，表中还加入了 5.1 中 2 阶分形贴片天线的初始谐振频率仿真值用于比较，2 阶分形贴片天线的中部孔洞边长尺寸为 0mm。

表 5.5 仿真计算得出的各贴片天线的初始谐振频率

中部孔洞边长 b (mm)	0	4	6	8
初始谐振频率 f_0 (GHz)	1.601	1.564	1.54	1.449

根据表 5.5 中的四种贴片天线的初始谐振频率信息可以得到辐射贴片中部矩形孔洞边长与 2 阶分形贴片天线初始谐振频率的关系如图 5.18 所示。

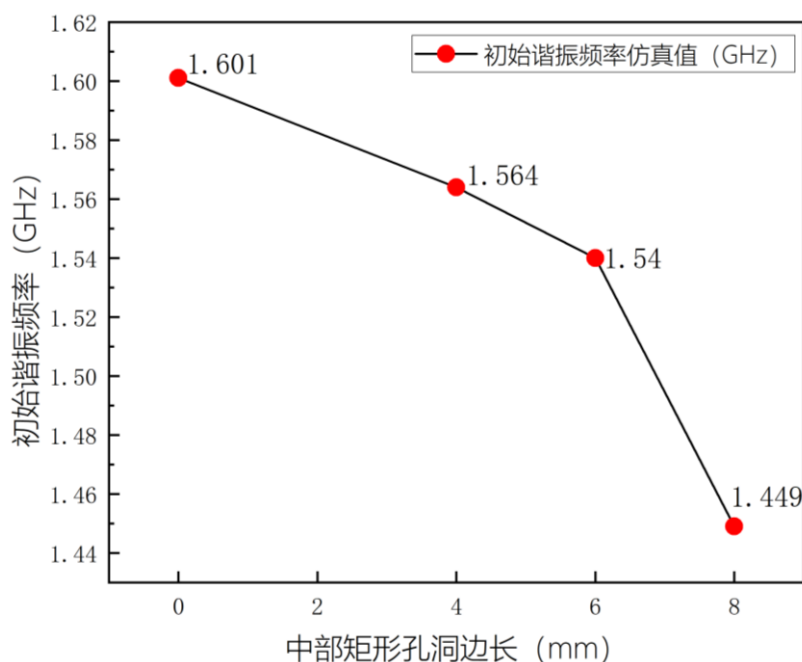


图 5.18 仿真中中部矩形孔洞边长与贴片天线初始谐振频率关系图

由图 5.18 可知, 带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的初始谐振频率小于原 2 阶分形贴片天线, 且随着中部矩形孔洞边长的增加, 分形贴片天线的初始谐振频率持续降低, 与 5.2.2 中的理论推测一致。

结合贴片天线的电流分布图中电流路径长度随着中部矩形孔洞边长增大而增大的现象, 图 5.18 的结果从仿真层面再一次论证了电流路径理论的正确性, 同时也初步验证了中部孔洞边长增加对贴片天线的初始谐振频率有降频作用, 根据小型化原理, 可以用作为调节贴片天线的尺寸变化的参数实现分形贴片天线传感器的湿度退敏小型化设计。

对于 5.2.3.1 中贴片天线湿度传感器监测水泥凝结时间的仿真测试, 根据仿真计算得到的三种贴片天线监测水泥凝结过程的 S11 曲线数据组, 可以从中提取他们的初始谐振频率变化信息如表 5.6 所示。为了便于理论验证, 表中还加入了第四章中 2 阶分形贴片天线的谐振频率变化信息用于比较, 2 阶分形贴片天线的中部孔洞边长尺寸为 0mm。

表 5.6 仿真中上覆水泥净浆介电常数 ϵ_2 变化时四种天线的谐振频率变化信息

水泥净浆 介电常数 ϵ_2	中部孔洞 边长 $b_0 = 0\text{mm}$	中部孔洞 边长 $b_1 = 4\text{mm}$	中部孔洞 边长 $b_2 = 6\text{mm}$	中部孔洞 边长 $b_3 = 8\text{mm}$
16	1.284	1.273	1.258	1.214
15	1.297	1.291	1.275	1.225
14	1.314	1.302	1.281	1.241

水泥净浆 介电常数 ε_2	中部孔洞 边长 $b_0 = 0\text{mm}$	中部孔洞 边长 $b_1 = 4\text{mm}$	中部孔洞 边长 $b_2 = 6\text{mm}$	中部孔洞 边长 $b_3 = 8\text{mm}$
13	1.331	1.311	1.295	1.257
12	1.356	1.313	1.304	1.27
11	1.359	1.337	1.321	1.285
10	1.369	1.364	1.34	1.312
9	1.392	1.376	1.355	1.318
8	1.411	1.393	1.37	1.336
7	1.415	1.405	1.384	1.352
6	1.449	1.423	1.402	1.365
5	1.489	1.443	1.431	1.384
4	1.514	1.472	1.45	1.4

根据表 5.6 中的数据，可以绘制上覆水泥净浆介电常数 ε_2 变化时四种天线的谐振频率变化趋势情况如图 5.19 所示。由图可知，仿真数据基本符合传感理论模型，随着上覆水泥净浆介电常数 ε_2 逐渐降低，四种贴片天线的谐振频率均单调升高；且上覆水泥净浆介电常数一致时，中部矩形孔洞边长越大的 2 阶分形贴片天线，谐振频率越低。同时对比第四章中的图 4.6 可知，图 5.19 中贴片天线的降频效应较弱，即此设计方式中中部矩形孔洞边长对贴片天线谐振频率作用的降频效应要弱于边缘分形孔洞的分形阶数的影响，在后续的解耦设计中，天线的尺寸控制主要由边缘分形孔洞的分形阶数主导。

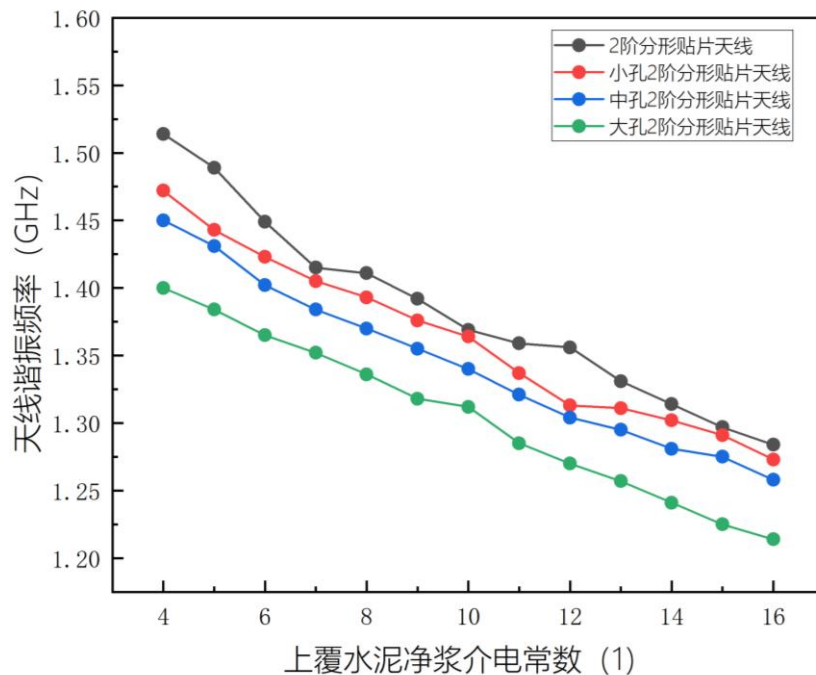


图 5.19 仿真中上覆水泥净浆介电常数 ε_2 变化时四种天线的谐振频率变化情况

故根据式 4.5 所示的水泥凝结时间监测传感灵敏度计算公式，以及本节中仿真计算得出的三种贴片天线的谐振频率信息，可以计算仿真中三种贴片天线的传感灵敏度及其下降率如表 5.7 所示。为了便于理论验证，表中还加入了第四章中 2 阶分形贴片天线的传感灵敏度信息用于比较，2 阶分形贴片天线的中部孔洞边长尺寸为 0mm。

表 5.7 仿真计算得出的各贴片天线传感器的传感灵敏度信息

中间矩形孔洞边长 b (mm)	0	4	6	8
初始谐振频率 f_0 (GHz)	1.601	1.564	1.54	1.449
谐振频率最小值 f_{min} (GHz)	1.284	1.273	1.258	1.214
传感灵敏度 S (%)	19.80%	18.61%	18.31%	16.22%
传感灵敏度下降率 (%)	/	6.01%	7.53%	18.08%

由表 5.7 中四种贴片天线传感器的传感灵敏度信息，可绘制仿真所得的中部矩形孔洞边长与 2 阶分形贴片天线传感器传感灵敏度的关系图如下图 5.20 所示。

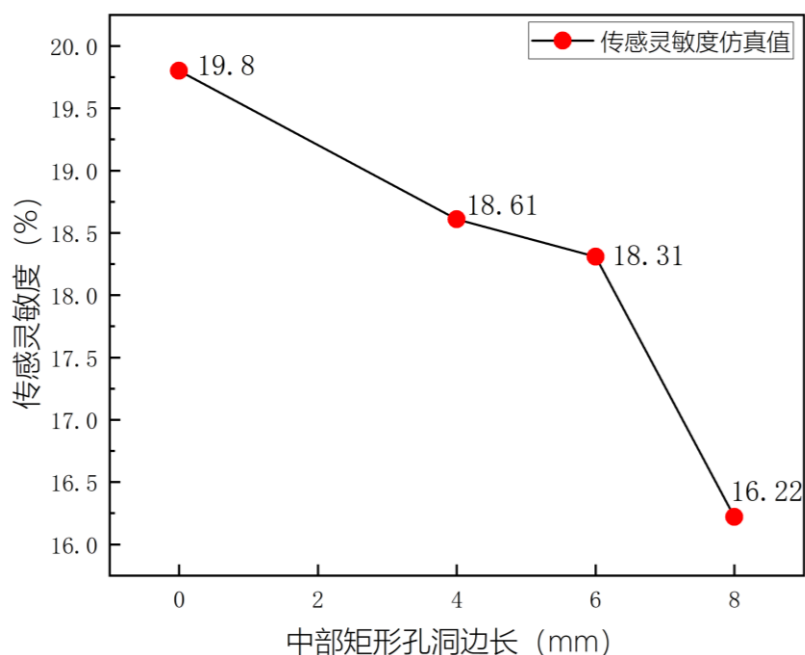


图 5.20 仿真中中部矩形孔洞边长与 2 阶分形贴片天线传感灵敏度关系图

由图 5.20 可知，在水泥凝结时间监测的应用场景下，带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的湿度感知灵敏度略小于原 2 阶分形贴片天线，且随着中部矩形孔洞边长的增加，分形贴片天线的湿度感知灵敏度持续下降。

根据本节中带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的初始谐振频率仿真结果与

水泥凝结时间监测传感灵敏度的仿真结果，可知中部孔洞对贴片天线谐振频率有降频作用，且对其湿度传感灵敏度有削弱作用；同时，中部孔洞的边缘长度增加时，贴片天线的初始谐振频率会继续减小，且湿度传感灵敏度也会继续下降，因此，5.2.1 中的孔洞位置理论得到仿真层面的初步验证。

随后，结合第三章与第四章中边缘分形孔洞的分形阶数变化时天线谐振频率与传感灵敏度的变化可知，边缘孔洞和中部孔洞的边缘长度的组合变化可对贴片天线的谐振频率以及传感灵敏度实现双向调节，故 5.2.1 中提出的解耦设计原理的正确性以及 5.2.2 中提出的解耦设计方法与也得到了仿真层面的初步验证。分形贴片天线传感器湿度退敏小型化设计的可能性也得到验证。

将本节的两个仿真结果与第三章与第四章中的两个仿真结果进行对比，可知在第三章中 2 阶分形贴片天线的设计基础上，引入的中部矩形孔洞对贴片天线谐振频率和传感灵敏度的影响远远小于边缘位置的四个 2 阶分形图案的孔洞的边缘长度变化带来的影响，这可能是 2 阶分形图案的边缘长度远远大于中部矩形孔洞的边缘长度所致，这也在验证解耦设计原理正确性的同时，提供了一种由边缘孔洞主导控制的解耦设计方法，在该设计方法中，由于中间矩形孔洞的边长增加带来的灵敏度降低效应相对微弱，这种设计方法可以实现在保持灵敏度基本不变的情况下将天线实现小型化的优化设计；同时根据完善后的边缘长度理论，可以推测将中部矩形孔洞更换为边缘长度更大且可以持续进行复杂化迭代的分形图案孔洞，中部矩形孔洞的对于灵敏度以及初始谐振频率的影响会相对变大，从而提供一种可以牺牲更多灵敏度来获取更小尺寸的由中部孔洞主导控制的解耦设计方法。

5.2.4 实验验证与结果讨论

在 5.2.3 中，孔洞位置理论、解耦设计原理的正确性以及带有中间孔洞的分形贴片天线的解耦设计方法的可行性和分形贴片天线传感器湿度退敏小型化设计的可能性已经通过仿真手段得到初步验证。

本节中，通过委托加工贴片天线以及设计水泥凝结时间监测等效灵敏度监测实验方案，完成了分形贴片天线谐振频率测试实验以及贴片天线湿度传感灵敏度测试实验。且通过对实验数据进行处理和分析，将得到的实验结果与理论假设和仿真模拟结果进行对比，根据三者比较结果的一致性，证明了仿真模拟结果的合理性，也从实验层面再次验证了理论的正确性以及设计方案的可行性。

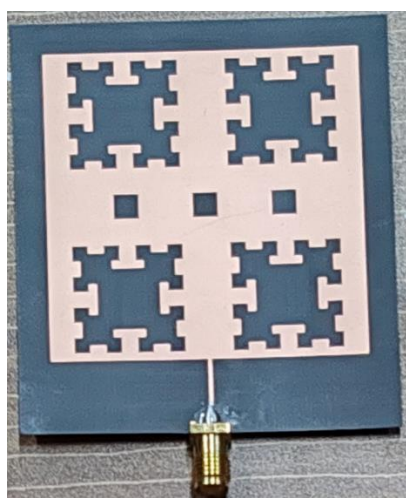
5.2.4.1 实验设计

将三种带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的具体尺寸图纸交由专业的第三

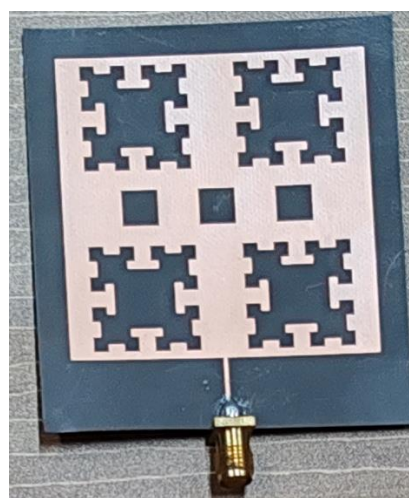
方天线加工机构并委托其根据 4.3 中的具体设计方案加工，得到了三种贴片天线如图 5.21 所示。这些加工的天线镀铜工艺为 OPS 抗氧化处理，表面十分光滑，图案尺寸精细化程度高，完全符合本章 5.2.3 中的设计方案，适合作为天线传感器使用。

运用同 5.1.3 中相同的测试方法对三种贴片天线进行初始谐振频率测试。利用矢量网络分析仪及同轴线的有线连接，依次对四种贴片天线的 S11 图像进行测试，在测试中记录天线的 S11 图像信息，并依次保存四种贴片天线的 S11 曲线数据，保存的数据为 0-3GHz 中均匀分布的有限个带有回波损耗信息的频率点，并提取每个天线的初始谐振频率。

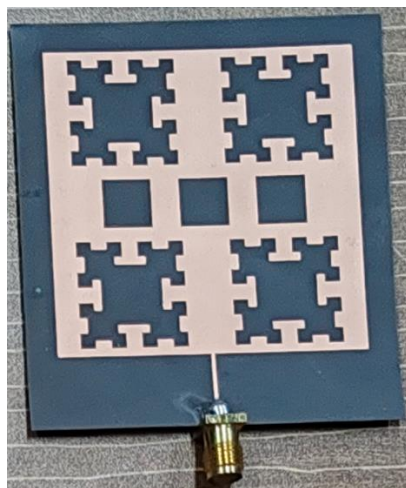
由于在以往的预实验中，当采用水泥砂浆作为上覆介质时，带有中间矩形孔的边缘开槽贴片天线的谐振频率表征不明显，导致应用水泥凝结时间监测实验来获取天线的传感灵敏度效果较差。因此，以贴片天线环境湿度监测模型为基础，由于砂砾的介电常数与水泥灰的介电常数一致，均为 4，且水泥凝结时间监测下贴片天线湿度传感灵敏度的计算方法只会运用到上覆介质含水率最高时以及无上覆介质时的谐振频率数据，故可以采用水和砂砾的混合料等效代替水泥砂浆作为上覆介质。将水砂比控制为 1:3，使含水率最高时水和砂砾混合物的介电常数为 16。



(a) 小孔 2 阶分形贴片天线



(b) 中孔 2 阶分形贴片天线



(c) 大孔 2 阶分形贴片天线

图 5.21 加工所得的带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线实物图

本实验的测试条件与 5.1.3 中水泥凝结时间监测实验的测试条件基本相同，如表 5.8 所示。采用与 5.1.3 中水泥凝结监测实验中基本相同的监测方法，包括如图 5.22 所示的应用塑料薄膜防水封装与亚克力盒子盛放上覆介质，并在干燥的砂砾中持续加入砂砾质量三分之一的纯净水如图 5.23 所示。利用矢量网络分析仪分别对 3 个天线的进行有线测试，对每个天线的谐振频率进行监测并在加水结束时记录具体数据。

表 5.8 贴片天线传感器湿度传感灵敏度测试实验环境参数

环境参数	亚克力盒子尺寸 (mm ³)	水与砂砾混合物 层厚度 (mm)	水砂比	环境温度 (℃)	环境湿度 (%)
参数值	74×74×10	10	1:3	15	41



图 5.22 放置在亚克力盒子中且带有防水封装的带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线传感器

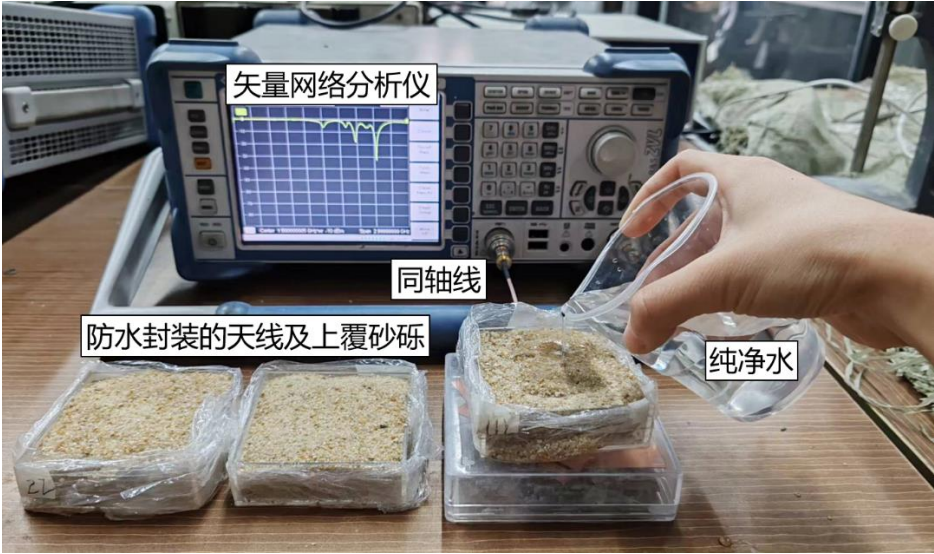


图 5.23 矢量网络分析仪监测贴片天线传感器在上覆砂砾和水混合物时的谐振频率

5.2.4.2 实验数据分析

根据 5.2.4.1 中贴片天线谐振频率测试实验得到的 S_{11} 曲线数据，可以从中提取三种贴片天线的初始谐振频率信息如表 5.9 所示。为了便于理论验证，表中还加入了本章 5.1 中 2 阶分形贴片天线的初始谐振频率实测值用于比较，2 阶分形贴片天线的中部孔洞边长尺寸为 0mm。

表 5.9 实验实测所得的各贴片天线的初始谐振频率

中部矩形孔洞边长 b (mm)	0	4	6	8
初始谐振频率 f_0 (GHz)	1.647	1.622	1.597	1.526

根据表 5.9 的数据信息，可以绘制中部矩形孔洞边长与 2 阶分形贴片天线初始谐振频率的关系图如图 5.24 所示。

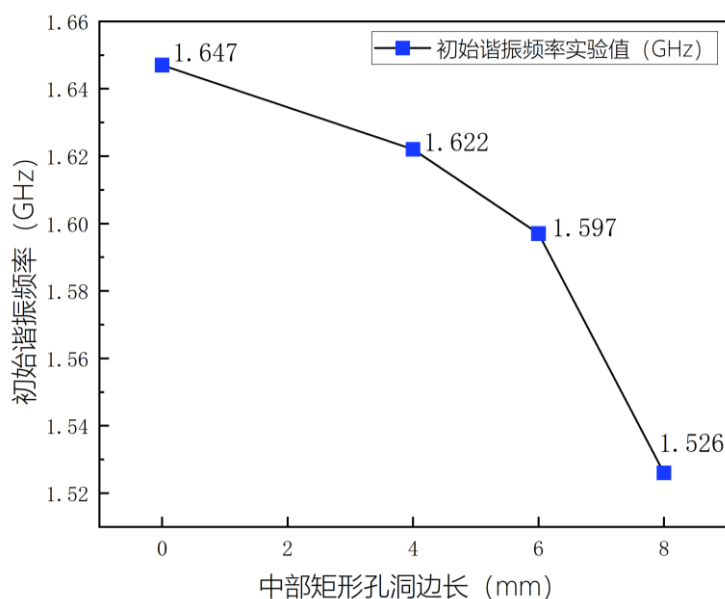


图 5.24 中部矩形孔洞边长与 2 阶分形贴片天线初始谐振频率的关系图

由图 5.24 可知, 通过实验测试, 带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的初始谐振频率小于原 2 阶分形贴片天线, 且随着中部矩形孔洞边长的增加, 带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的初始谐振频率持续降低。

对于本节中三种贴片天线传感器的湿度传感灵敏度, 将实验中所测得的三种贴片天线的谐振频率信息代入式 4.5, 可以计算该实验中三种贴片天线的湿度传感灵敏度及其提升率如表 5.10 所示。为了便于理论验证, 表中还加入了第四章中 2 阶分形贴片天线的湿度传感灵敏度实测值用于比较, 2 阶分形贴片天线的中部孔洞边长尺寸为 0mm。

表 5.10 实验实测所得的各贴片天线的湿度传感灵敏度信息

中部矩形孔洞边长	-1	0	1	2
初始谐振频率 f_0 (GHz)	1.647	1.622	1.597	1.526
谐振频率最小值 f_{min} (GHz)	1.303	1.346	1.329	1.291
传感灵敏度 S (%)	20.91%	17.01%	16.74%	15.42%
传感灵敏度提升率 (%)	/	18.65%	19.94%	26.26%

根据表 5.10 的数据信息, 可以绘制中部矩形孔洞边长与 2 阶分形贴片天线湿度传感灵敏度的关系图如图 5.25 所示。

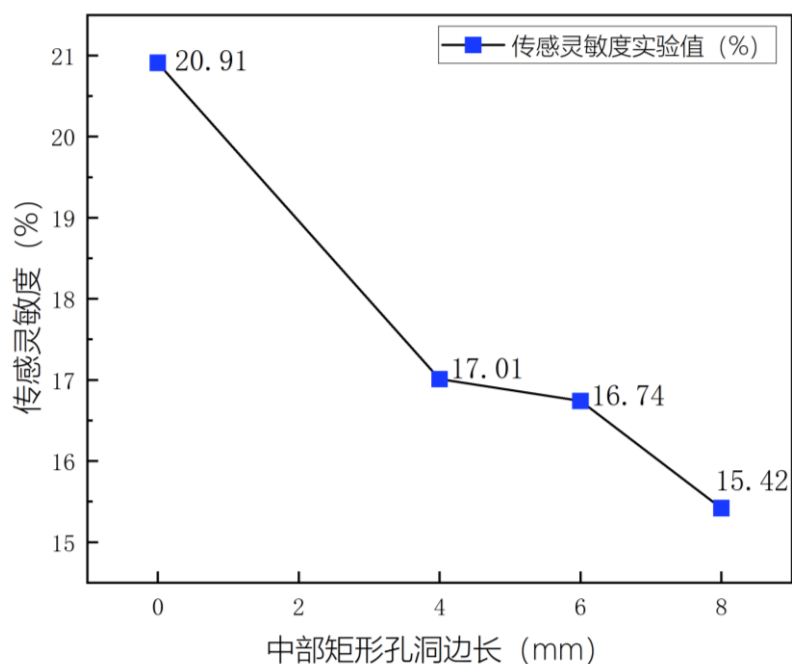


图 5.25 中部矩形孔洞边长与 2 阶分形贴片天线湿度传感灵敏度的关系图

由图 5.25 可知，实际实验中带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的传感灵敏度低于原 2 阶分形贴片天线，且中部矩形孔洞边长的增加，贴片天线的传感灵敏度也呈现继续下降的趋势。且中部孔洞边长的增加对贴片天线传感灵敏度的削弱程度较弱，使其下降了原有水平的 18%至 27%。

5.2.4.3 实验结果讨论

为便于比较分析，将 5.2.3 中模拟得到的四种贴片天线的初始谐振频率与本小节中实验测得的四种贴片天线的初始谐振频率按照中部矩形孔洞边长依次增大的规律绘制在同一张关系图中，得到图 5.26 如下所示（2 阶分形贴片天线的矩形孔洞的边长大小为 0mm）。

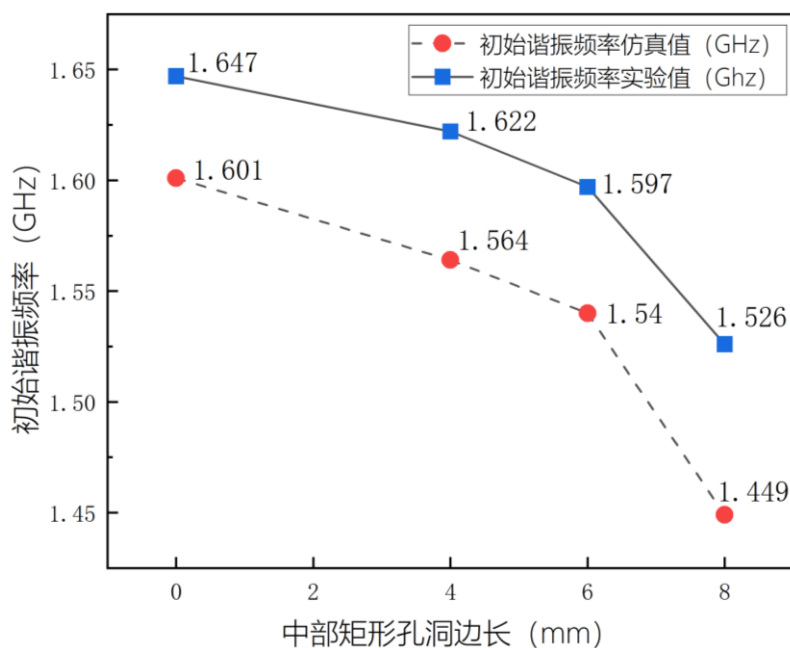


图 5.26 四种带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线初始谐振频率仿真值与实验值对比图

用同样的分析比较思路，将 5.2.3 中四种贴片天线传感灵敏度的仿真值与本小节中四种贴片天线传感器传感灵敏度的实验实测值按照中部矩形孔洞边长依次增大的规律绘制在同一张关系图中，可以得到图 5.27 如下所示（2 阶分形贴片天线的矩形孔洞的边长大小为 0mm）。

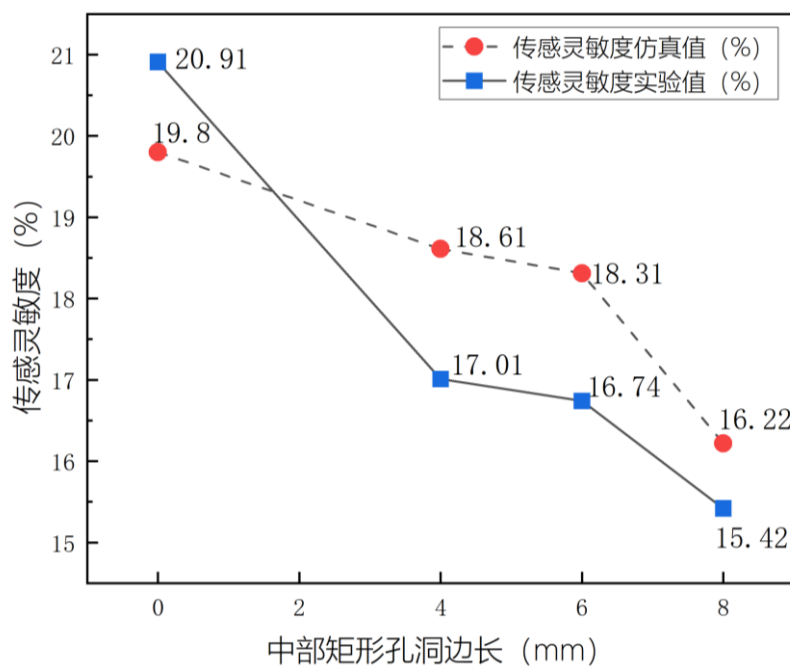


图 5.27 四种带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线湿度传感灵敏度仿真值与实验值对比图

由图 5.26 可知，每种贴片天线初始谐振频率的仿真值与实验值基本一致，

以理论模型下的仿真计算值为基准, 每种贴片天线的谐振频率的实验实测值的相对误差均在 6% 以内。所有贴片天线初始谐振频率的实验值均低于仿真值的原因可能是仿真模型中的辐射边界的范围小于实际实验情况所致, 但由于实际的辐射边界是无限远处, 故此系统误差可以通过在仿真中不断增大辐射边界被逐渐减小, 使谐振频率的仿真值无限逼近实测值, 达到等效效果, 但本身无法完全消除。

随着中部矩形孔洞边长的增加, 带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的初始谐振频率在仿真与实验中均一致保持降低趋势。实验结果与仿真结果的一致, 不仅验证了仿真的合理性, 也在仿真初步验证理论假设的基础上, 再一次以实际实验证明了电流路径理论的正确性, 同时也从实际实验层面证实了中部孔洞边长增加对贴片天线的初始谐振频率有降频作用, 根据小型化原理, 可以在实际设计中将中部孔洞用作为调节贴片天线的尺寸变化的参数, 在分形阶数较高的情况下, 为分形贴片天线传感器湿度退敏的小型化设计提供了一种设计方法。

由图 5.27 可知, 带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的传感灵敏度的仿真值与实验值基本一致, 以理论模型下的仿真计算值为基准, 分形贴片天线的实验值的相对误差均在 10% 以内。对比第三章中 3.5.2 的实验结果可知, 包括 2 阶分形贴片天线在内的第三章中所有用水泥砂浆作为上覆介质的分形贴片天线, 其实验测得传感灵敏度均大于仿真值, 而本章中利用砂砾与水混合物测得的带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线的传感灵敏度均小于仿真值, 且每种天线实验值与仿真值的差距较为一致。两个实验对应的两种仿真条件是一致的, 实际中两种上覆介质虽能在介电常数模型上实现等效替代, 但两种上覆介质本身是两种不同的物质, 存在一定差异。因此, 可以怀疑是由于等效替代上覆介质这一操作造成了两种实验测得的天线传感灵敏度与仿真值表现出的误差并不随机, 表现出与实验本身差异的相关性。但是, 也不能排除是测试中随机误差以及其他环境因素带来的系统误差所造成了这一较为偶然的現象。

且对于图 5.27, 分别观察仿真值与实验值两条数据点连接的曲线, 可知两者均具有单调递减性, 即随着中部矩形孔洞边长的增大, 分形贴片天线的传感灵敏度在仿真与实验中均一致保持降低趋势。贴片天线湿度传感灵敏度测试实验结果与仿真结果的一致, 不仅验证了仿真的合理性, 也在仿真初步验证理论假设的基础上, 进一步以实际实验证明了 5.2.1 中孔洞位置理论和解耦设计原理的正确性以及基于中部孔洞的分形贴片天线解耦设计方法的可行性。由于灵敏度下降程度较低, 即对于分形贴片天线湿度传感器, 在天线中部挖去矩形孔洞并增大矩形孔洞的边长可以在基本不改变传感灵敏度的情况下进一步缩减天线的尺寸。

5.3 本章小结

本章介绍了分形贴片天线与带有中部孔洞的分形贴片天线的小型化原理以及小型化设计方法，并完成了模拟仿真与实际实验验证，总结如下：

(1) 介绍了电流路径理论与贴片天线小型化原理，对于矩形贴片天线湿度传感器，依据理论选用第三章中类闵可夫斯基 X 分形的分形设计方法，对原矩形贴片天线和分形阶数依次增加的三个分形贴片天线进行了初始谐振频率测试模拟与实验，对比模拟与实验结果，得出结论：分形贴片天线的初始谐振频率低于矩形贴片天线，且分形贴片天线的分形阶数与初始谐振频率呈线性负相关关系，即在工作频率固定时，分形贴片天线传感器的分形阶数与其设计尺寸呈负相关关系，故分形贴片天线的小型化原理与设计方法均得到了验证。

(2) 对于分形贴片天线湿度传感器，分形阶数同时控制传感器的传感灵敏度与初始谐振频率（即天线尺寸），在分形阶数达到边界值时，为了实现传感器湿度退敏的小型化设计，在第三章分形贴片天线小型化增敏设计方案的基础上，根据孔洞位置理论与尺寸和灵敏度的解耦设计原理，提出了一种带有中部矩形孔洞的分形贴片天线传感器的小型化设计方法；并通过对三个带有中部矩形孔洞的 2 阶分形贴片天线以及不带有中部孔洞的 2 阶分形贴片天线进行初始谐振频率测试以及湿度传感灵敏度的模拟和实验，对比模拟与实验结果，得出结论：矩形孔洞的边长与贴片天线传感器的初始谐振频率和传感灵敏度均呈现线性负相关关系，故对于第三章中提出的分形贴片天线，在其中部挖去矩形孔洞，可以在保持贴片天线传感器传感灵敏度基本不变的情况下继续降低其初始谐振频率，从而实现分形贴片天线传感器湿度退敏的小型化设计，孔洞位置理论与解耦设计原理也都得到了初步验证。

(3) 对比分形贴片天线与带有中部孔洞的分形贴片天线的仿真与实验结果，可以发现在带有中部孔洞的分形贴片天线小型化设计方案中，边缘的分形孔洞起主要控制作用；对于贴片天线湿度传感器的尺寸与传感灵敏度的解耦设计方法探究及原理验证，本章只在分形贴片天线小型化的目标下提出了一种带有中部孔洞的分形贴片天线形式，后续应探究更多的孔洞位置与孔洞形状的组合来完善解耦方法并验证解耦原理。

(4) 在带有中部孔洞分形贴片天线湿度传感器的传感灵敏度测试实验中，利用水和砂砾混合物等效代替水泥设计的湿度灵敏度测试实验所得的传感灵敏度实验值均小于仿真值，这与第四章水泥凝结时间监测实验中得到的所有贴片天线的传感灵敏度均大于仿真值这一现象有明显差异，推测可能是由于水和砂砾的混合物代替水泥进行灵敏度测试实验所致，在后续设计中最好能在完全保

持实验环境与条件一致性的情况下完成传感灵敏度测试，同时对于本章中的天线谐振频率表征效果不佳的现象也需要在后续研究中得到解释与改善方案。

第6章 分形贴片天线结构形变传感器增敏效果影响研究

目前贴片天线在结构形变监测领域已经得到了非常广泛的应用,由于其体积小、重量轻,且贴片天线的谐振频率和幅值都可以作为良好的传感表征信号,故非常适合作为小型传感器设置于结构的脆弱部位或频繁发生形变的部位监测结构的形变变化。

贴片天线形变传感器种类繁多,且设计机理也不尽相同,大多数贴片天线形变传感器是通过建立一种形变传递模型,将形变带来的物理位移信号,转化为贴片天线通讯参数的电信号(如谐振频率、相位、幅值等)。本章主要探究了在无应力式贴片天线形变传感器和空气间隙式贴片天线形变传感器这两种形变传感器的基础上,通过将其辐射贴片优化设计成分形贴片的形式后,贴片天线形变传感器工作谐振频率以及传感灵敏度的变化。基于这些工作性能变化的探究结果,为原有的贴片天线形变传感器提供了小型化以及提升传感灵敏度的优化设计方法。

在6.1节中,主要介绍了无应力式贴片天线传感器的工作原理。以此工作原理为基础,提出了一种应用分形贴片的小型化增敏设计方案,并从理论上解释了该方案的小型化增敏机制。通过仿真模拟对比了优化设计前后贴片天线传感器的初始谐振频率以及形变传感灵敏度,最终得出了结论。

在6.2节中,主要介绍了空气间隙式贴片天线传感器的工作原理。以此工作原理为基础,提出了一种应用分形贴片的小型化设计方案,并从理论上解释了该方案的设计原理。以该小型化设计方案为基础,经过理论公式推导,推测该设计方案下,传感器的传感灵敏度会下降,但无法定量判断下降程度。通过仿真模拟对比了两种贴片天线传感器的初始谐振频率以及位移传感灵敏度,最终得出了结论。

6.1 无应力式分形贴片天线形变传感器

Xue等^[110]提出了一种基于附加短接贴片天的无应力式贴片天线裂缝传感器,该传感器通过在矩形贴片天线上部以短接的形式附加一个与结构连接的可随裂缝宽度变化而移动的铜贴片,当结构产生裂缝时,形变发生,形变传递到该铜贴片与天线上矩形辐射贴片的相对位移上,此时由于短接连接,矩形贴片天线的贴片辐射长度也会同时发生变化,由此天线的谐振频率发生变化,谐振频率表征裂缝宽度的传感路径形成闭环。

本节中，在无应力式贴片天线形变传感器的模型基础上，根据电流路径理论与降频叠加效应理论预测了应用第三章中提出的 2 阶分形贴片进行小型化增敏设计的可行性，通过在仿真中对原无应力式贴片天线传感器和将辐射贴片与附加短接贴片均更换为 2 阶分形贴片的分形贴片天线传感器进行形变传感模拟，并对比仿真结果，探究了理论推测和设计方法的可行性。

6.1.1 传感器设计原理

6.1.1.1 无应力式贴片天线形变传感器基本原理

无应力式贴片天线形变传感器具体的构成如图 6.1 所示，图中，上辐射贴片、下接地平面以及短接贴片都采用铜质，贴片天线基板和短接贴片的介质基板均采用 RT5880 材质基板。短接贴片与上辐射贴片一起构成等效辐射贴片，在具体的使用中，该天线可以安装在结构上，使天线在主体不受力的情况下，测量结构变形的效果。

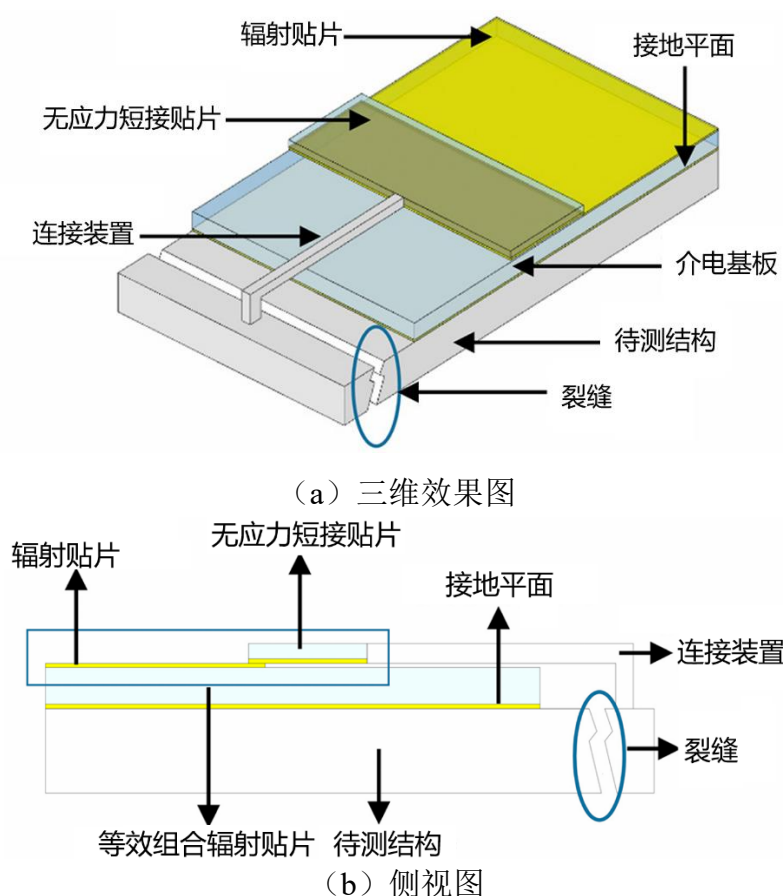


图 6.1 无应力式贴片天线形变传感器示意图 [110]

结构发生变形时，短接贴片与贴片天线在结构上的连接点会产生相对位移，从而导致短接贴片和贴片天线相对错动，此时等效辐射贴片的长度发生变化，

从而引起贴片天线谐振频率的变化，通过测量天线谐振频率的改变量，可以对结构的变形进行表征，天线传感器的谐振频率具体的计算公式如下式 6.1 所示。

$$f = \frac{c}{2L_t\sqrt{\varepsilon}} = \frac{c}{2(L_1+L_s-L_o)\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (6.1)$$

其中， L_t 为等效辐射贴片的长度， L_1 为贴片天线上辐射贴片的长度， L_s 为短接贴片的长度， L_o 是短接贴片天线与上辐射贴片天线重叠部分的长度，之后都称为短接长度，其余参数含义与式 5.1 相同。

6.1.1.2 分形贴片天线传感器小型化原理

无应力式分形贴片天线的传感原理与矩形贴片天线相同，故由第五章 5.1.1 中提出的电流路径理论可知，修改该传感器辐射贴片与短接贴片的形状（边缘切割、开洞等），使等两者组合而成的等效辐射贴片表面形状的复杂度提升，就可以使天线工作时表面的电流路径变大，由式 5.2 可知，贴片天线的有效长度也会因此增大，最终根据式 5.1 得知，此时无应力式贴片天线传感器的初始谐振频率会下降，根据贴片天线小型化原理，可以通过将矩形贴片修改为分形形状来实现无应力式贴片天线传感器的小型化设计。

因此可以做出理论预测，将第三章中提出的 2 阶分形贴片应用于无应力贴片天线传感器，会使其初始谐振频率降低。

6.1.1.3 分形贴片天线传感器形变传感增敏机制

如果将无应力式贴片天线传感器的短接贴片与辐射贴片均修改为表面形状多孔且边缘复杂的 2 阶分形贴片形状，在短接贴片与辐射贴片产生相对错动时，两者组合而成的等效辐射贴片的表面形状也在发生变化，且复杂度逐渐提高。图 6.2 展示了两个 2 阶分形贴片产生 0 至 8mm 的错动过程中，等效辐射贴片表面形状的变化过程（图中粉色部分为短接贴片，黄色部分为原辐射贴片，黑色部分为两者组合而成的等效辐射贴片）。

因此由电流路径理论可知，等效辐射贴片的表面形状复杂度提升，贴片天线的有效长会增加，天线的工作频率会下降。分析该等效辐射贴片有效长度的变化情况可知：两片贴片错动位移的增加，会使等效辐射贴片的总长度增加，同时由于错动位移增加带来的表面形状复杂度的提升，会使得等效辐射贴片在其总长度增加的情况下，继续增加其有效长度。这种有效长度的叠加式增长反映到谐振频率的变化上会使谐振频率的下降程度增大，下降效果更加明显，由此贴片天线形变传感的灵敏度也因此工作模式的变化而提升。

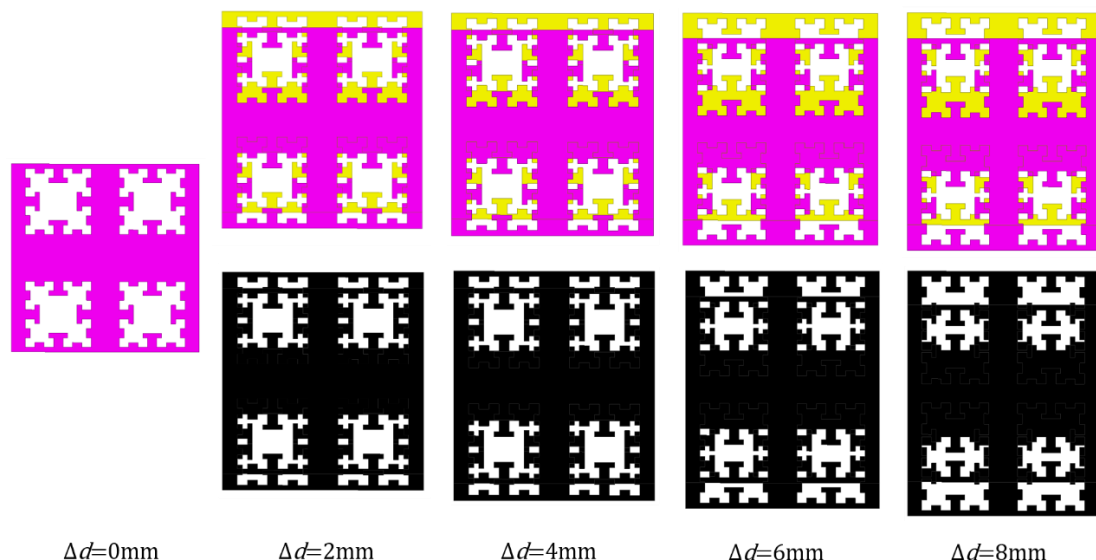


图 6.2 等效辐射贴片随形变变化产生的表面形状变化示意图

除了分析形变增加时分形贴片天线的传感过程的变化情况以外，也可以直接从对理论公式中的变量分析得出 2 阶分形贴片天线传感灵敏度提升的结论。

根据式 5.1 可知，在基板介电常数不变的情况下，贴片天线有效长度相对于介电常数越大，其对谐振频率的影响也越明显。故有效长度的初始值增大后，当有效长度发生变化时，天线的谐振频率的变化将比初始有效长度较小时更加明显，这种由于有效长度增大带来的谐振频率变化放大效应反映在无应力式贴片天线传感器上即可表现为，初始有效长度更大的 2 阶分形贴片天线传感器的形变传感灵敏度要大于矩形贴片天线。

6.1.2 仿真分析

为了验证无应力式分形贴片天线形变传感器的小型化增敏设计相关原理的正确性以及设计方法的可行性，通过对矩形和分形两种形式的形变传感器进行仿真建模分析，比较两者的仿真结果，分析得出结论。

6.1.2.1 HFSS 建模

在 HFSS 高频仿真软件中建立无应力式矩形贴片天线形变传感器与分形贴片天线传感器如图 6.3 所示。该传感模型中贴片天线的尺寸信息与第三章中的矩形贴片天线与 2 阶分形贴片天线一致，且根据 6.1.1 中的设计方案，将分形贴片天线传感器的短接贴片设置成大小、形状与其辐射贴片一致的状态。两种天线的基板材料均采用 RT5880 高频压合板，其介电常数为 2.2 且保证仿真中环境温度恒定。为了测试两者的初始灵敏度与分析计算形变传感灵敏度，设置两者的

贴片相对位移为 HFSS 全局变量，位移遍历范围为 0mm-8mm，步长为 1mm。所有天线整体均采用平面波馈电，为了模拟无限远处的天线辐射效应，设置边界为 PML 辐射吸收边界，降低算力需求；由于金属作为良性导体，平面波的趋肤深度很低，天线的上辐射贴片、节点平面在仿真中采用无厚度平面，并将边界设置为完美电壁（Perfect E）来对良性导体平面进行模拟。

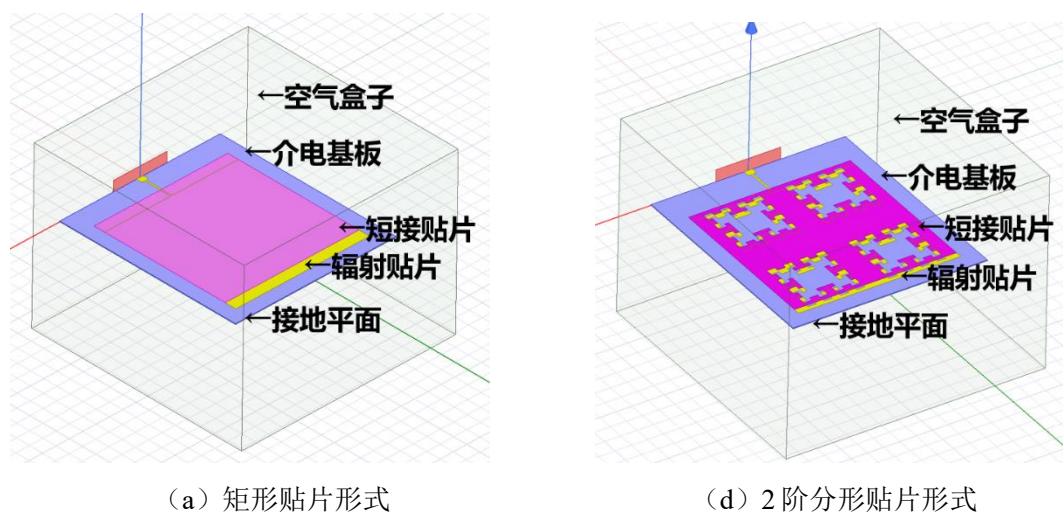


图 6.3 两种无应力式贴片形变传感器仿真中的模型图

6.1.2.2 模拟结果

根据仿真遍历计算得到的位移变化时两种贴片天线传感器的 S_{11} 曲线数据，可以从中提取他们的谐振频率随贴片相对位移变化信息如表 6.1 所示。

表 6.1 仿真中两种无应力式贴片天线形变传感器谐振频率变化信息

贴片相对位移 (mm)	矩形贴片天线 谐振频率 (GHz)	2 阶分形贴片天线 谐振频率 (GHz)
0	1.94	1.601
1	1.909	1.522
2	1.87	1.392
3	1.834	1.331
4	1.799	1.259
5	1.763	1.205
6	1.733	1.176
7	1.691	1.149
8	1.667	1.126

根据表 6.1 中两种贴片天线传感器的谐振频率信息可以得到两者的谐振频率与贴片相对位移的关系如图 6.4 所示。

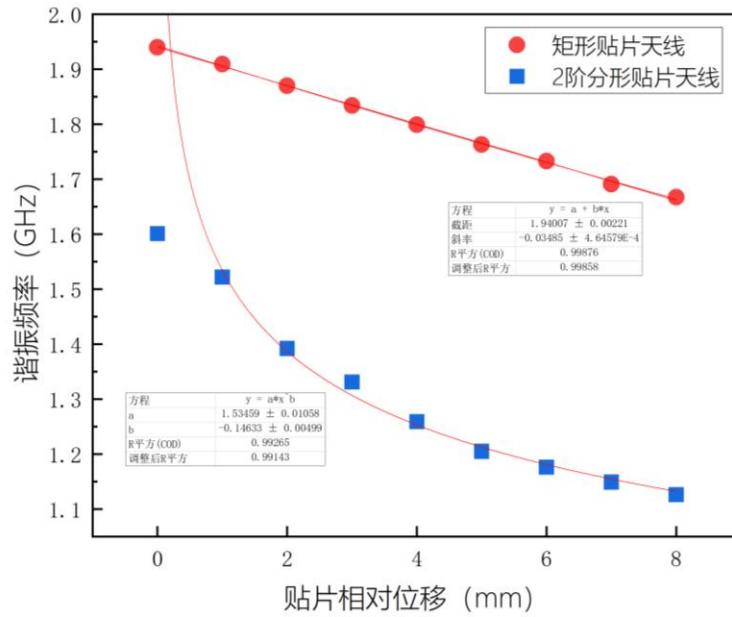


图 6.4 仿真中两种贴片天线传感器的谐振频率与贴片相对位移变化关系图

由图 6.4 可知，无应力式 2 阶分形贴片天线形变传感器的初始谐振频率及传感工作时的谐振频率均小于矩形贴片天线传感器，故电流路径理论再一次得到验证且小型化设计方案的可行性也得到了验证。

对于两个天线各自的谐振频率与贴片相对位移的表征关系，矩形贴片天线呈现出良好的线性关系，曲线拟合的相关系数为 0.99858，而对于分形贴片天线，这种关系的拟合曲线是一条次数为负且绝对值小于 1 的幂函数曲线，曲线拟合的相关系数为 0.99143。

分形贴片天线的两个变量之间并不是线性关系，印证了 6.1.1 中传感灵敏度提升的原理，由于分形贴片天线的有效长度相对矩形贴片天线更大，故其有效长度变化时谐振频率的变化也更加明显，这种放大效应反映到图像便是将原本代表矩形天线的远离坐标轴且传感范围内数据拟合关系接近线性关系的非线性曲线，缩放成为了一条代表分形天线的更加靠近坐标轴且传感范围内的数据关系更接近非线性关系的曲线。

定义无应力式贴片天线形变传感器的传感灵敏度 S 可以由下式 6.2 计算得出。

$$S = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\Delta d} \quad (6.2)$$

将表 6.1 中的数据代入式 6.2 可以得到矩形贴片天线形变传感器与 2 阶分形贴片天线形变传感器的形变传感灵敏度如下表 6.2 所示。

表 6.2 仿真中两种贴片天线形变传感器的传感灵敏度信息

天线类别	矩形贴片天线	2 阶分形贴片天线
形变传感灵敏度 (GHz/mm)	0.03413	0.05938
灵敏度提升率 (%)	/	73.99%

由表 6.2 可知, 当贴片位移在 0mm 至 8mm 的变化范围内, 应用 2 阶分形贴片的无应力式贴片天线形变传感器的传感灵敏度相对于原矩形贴片形式提升了 73.99%, 在仿真层面初步验证了 6.1.1 中的增敏机制与增敏设计方法的可行性。

由于该无应力式贴片天线形变传感器主要用于监测结构的裂缝的变化, 而常见的结构的裂缝的宽度一般在 0mm 至 2mm 之间, 世界范围内常用的混凝土结构裂缝宽度规范中对裂缝的最大宽度的规定一般也在 0.5mm 以内; 且在图 6.4 中, 通过观察 2 阶分形贴片天线谐振频率拟合曲线的斜率, 可知无应力式 2 阶分形贴片天线传感器在 0mm 至 3mm 的工作范围内灵敏度最高, 该高灵敏度传感范围与裂缝监测传感器的工作范围是一致的。

根据以上结论, 在仿真重新设置相对位移变量的计算范围与步长, 将遍历计算范围设置为 0mm 至 2mm, 将步长设置为 0.1mm, 对两种贴片天线传感器的传感模型进行新一轮仿真测试。

根据仿真遍历计算得到的位移在 0mm 至 2mm 范围内变化时两种贴片天线传感器的 S11 曲线, 可从中提取他们的谐振频率变化信息如表 6.3 所示。

表 6.3 仿真中两种无应力式贴片天线形变传感器谐振频率变化信息 (0-2mm)

贴片相对位移 (mm)	矩形贴片天线 谐振频率 (GHz)	2 阶分形贴片天线 谐振频率 (GHz)
0	1.94	1.601
0.1	1.941	1.598
0.2	1.936	1.581
0.3	1.933	1.576
0.4	1.929	1.569
0.5	1.925	1.563
0.6	1.916	1.56
0.7	1.919	1.544
0.8	1.907	1.541
0.9	1.906	1.532
1	1.908	1.522
1.1	1.901	1.513
1.2	1.9	1.504
1.3	1.886	1.494
1.4	1.893	1.483
1.5	1.888	1.475
1.6	1.885	1.466
1.7	1.879	1.457
1.8	1.877	1.446
1.9	1.873	1.437
2	1.87	1.392

根据表 6.3 中两种贴片天线传感器的谐振频率信息可以得到贴片相对位移在 0mm-2mm 时两者的谐振频率与贴片相对位移的关系如图 6.5 所示。

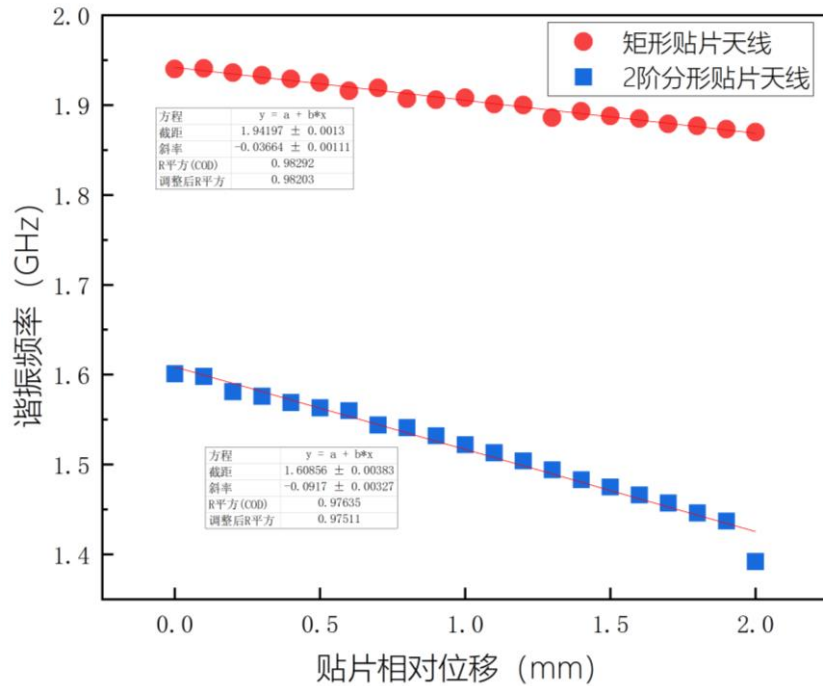


图 6.5 仿真中两种贴片天线传感器的谐振频率与贴片相对位移变化关系图 (0-2mm)

将表 6.3 中的数据代入式 6.2 可以得到矩形贴片天线形变传感器与 2 阶分形贴片天线形变传感器在 0mm 至 2mm 范围内形变传感灵敏度如下表 6.4 所示。

表 6.4 仿真中两种贴片天线形变传感器的传感灵敏度信息 (0-2mm)

天线类别	矩形贴片天线	2 阶分形贴片天线
形变传感灵敏度 (GHz/mm)	0.035	0.1045
灵敏度提升率 (%)	/	198.57%

由表 6.4 可知, 当贴片位移在 0mm 至 2mm 的变化范围内, 应用 2 阶分形贴片的无应力式贴片天线形变传感器的传感灵敏度相对于原矩形贴片形式提升了 198.57%。

以上仿真结果不仅再次验证了分形贴片增敏设计方法的可行性, 且相比原有的形变传感器, 在符合该形变传感器应用要求的传感测量范围内实现了近两倍的增敏效果。

6.2 空气间隙式分形贴片天线形变传感器

Xue 等^[11]提出了一种基于双层开槽圆形贴片天线的螺栓松动检测方法, 该

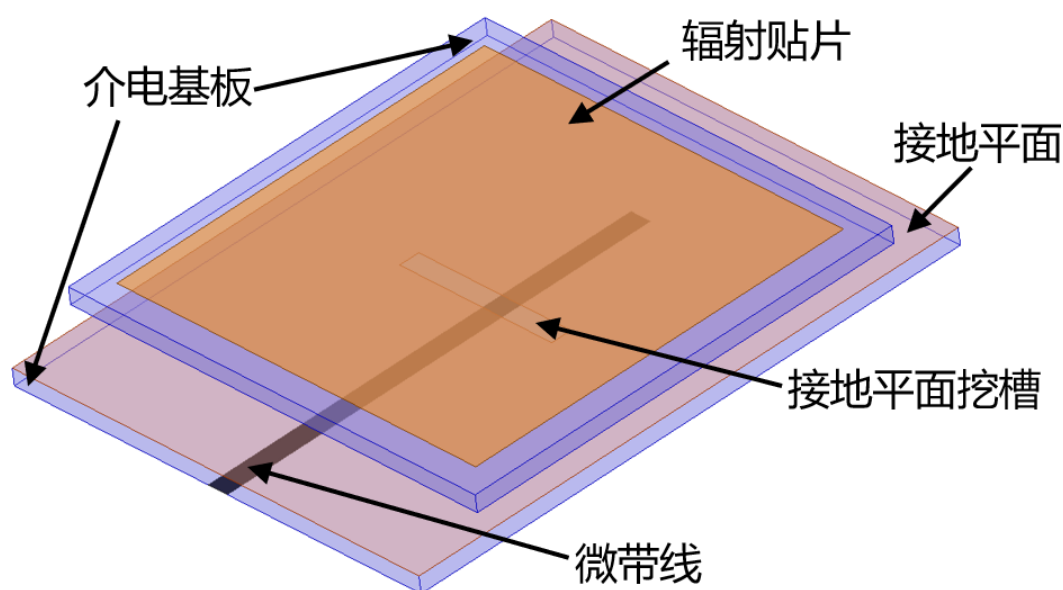
圆形贴片天线实际上是一个空气间隙式贴片天线形变传感器。该传感器通过将贴合螺栓上表面形状贴片天线与螺栓进行结合，将螺栓的纵向长度变化转化为天线空气间隙厚度的变化，从而引起圆形天线等效介电常数的变化，由此引起谐振频率的变化。因此，圆形贴片天线的谐振频率即可传感表征螺栓的相对位移，从而监测螺栓的松动情况。

本节中，在监测螺栓松动的空气间隙式贴片天线形变传感器的模型基础上，将圆形贴片天线更换为矩形贴片天线，并根据电流路径理论与降频叠加效应理论预测了应用第三章中提出的 2 阶分形贴片进行小型化设计的可行性，通过在仿真中对两种贴片天线进行形变传感模拟，并对比仿真结果，探究了理论推测和设计方法的可行性。

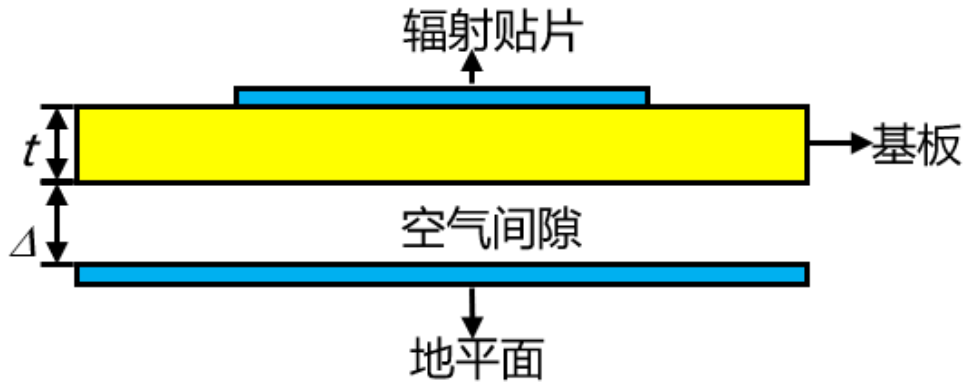
6.2.1 传感器设计原理

6.2.1.1 空气间隙式贴片天线形变传感器基本原理

空气间隙式贴片天线形变传感器具体的构成如图 6.6 所示，图中，上辐射贴片和接地平面都采用铜质，贴片天线基板和短接贴片的介质基板均采用 RO3010 材质基板。馈电方式采用孔径耦合馈电方式将馈电网络与辐射贴片分离，减少寄生电容电感。在具体的传感工作中，通过将该天线传感器安装在被监测结构上，结构产生垂直天线平面的形变时，介质基板与接地平面之间的空气间隙厚度发生变化，此时贴片天线的等效介电常数发生变化，天线的谐振频率也因此变化。结构的形变通过空气间隙厚度转化为天线谐振频率的变化，通过观测天线的谐振频率变化情况，可以实现对结构变形的监测。



(a) 三维效果图



(b) 侧视图

图 6.6 空气间隙式矩形贴片天线形变传感器示意图

考虑导电贴片下的空腔由厚度为 t 的介质基板层和厚度为 Δ 的空气间隙两层组成。与没有空气间隙层的情况相比，空腔的有效介电常数明显减小，从而使各模态的共振振幅增大。由于有效介电常数随 Δ 的增大而减小，趋于自由空间的介电常数，故可以通过调节空气间隙厚度 Δ 来调节谐振频率。

考虑两层介电层的电容，可推导出两层腔体的近似有效介电常数和近似谐振频率，如图 6.7 所示。其中 ε_1 和 ε_2 分别为上下电容的介电常数， d_1 和 d_2 分别为两者的平行板间距。

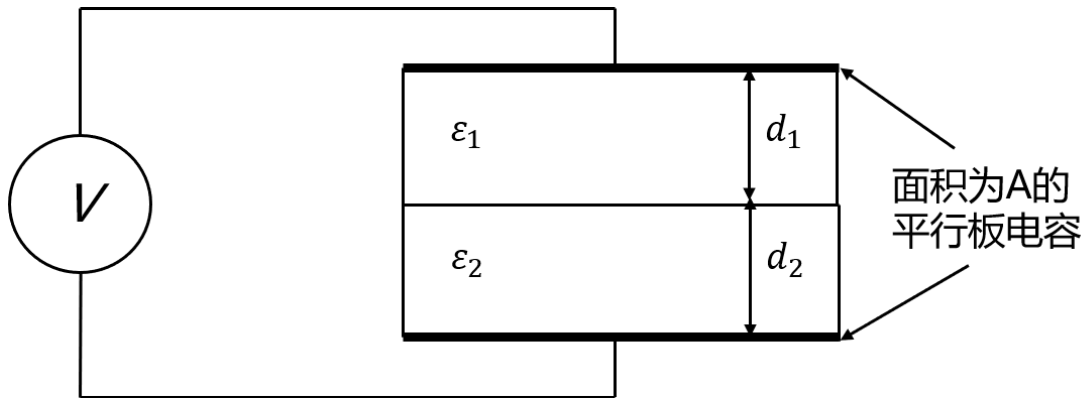


图 6.7 双层电介质电容等效模型

该模型的上层电容 C_1 和下层电容 C_2 分别如下式 6.3 和式 6.4 所示。

$$C_1 = \frac{\varepsilon_1 A}{d_1} \quad (6.3)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_2 A}{d_2} \quad (6.4)$$

则根据并联电容计算公式可知两者的总电容 C 如下式 6.5 所示。

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 A}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} = \frac{\varepsilon_{eff} A}{d_1 + d_2} \quad (6.5)$$

其中，等效介电常数 ε_{eff} 由下式 6.6 所示。

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} \quad (6.6)$$

将上层视为相对介电常数为 ε_r 的基板，下层为空隙间隙，则有以下式 6.7 至式 6.11 的推导过。

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \quad (6.7)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_r \varepsilon_0 = \varepsilon \quad (6.8)$$

$$d_1 = t \quad (6.9)$$

$$d_2 = \Delta \quad (6.10)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (t + \Delta)}{\varepsilon_r \varepsilon_0 \Delta + \varepsilon_0 t} = \frac{\varepsilon (t + \Delta)}{(t + \Delta \varepsilon_r)} \quad (6.11)$$

其中 ε_0 为真空介电常数，将有效介电常数用于谐振频率的计算公式式 3.4 可以得到空气间隙式贴片天线形变传感器的谐振频率 f 与空气间隙 Δ 的关系表达式如式 6.12 所示。

$$f(\Delta) = f(0) \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{eff}}} \quad (6.12)$$

式中， $f(0)$ 为无空气间隙时天线的谐振频率。由该式可知，随着空气间隙厚度增加，天线基板的等效介电常数 ε_{eff} 会减小，天线的谐振频率增大，由此实现形变信息的传感。

6.2.1.2 空气间隙式分形贴片天线传感器小型化原理

空气间隙式分形贴片天线的传感原理与矩形贴片天线相同，故根据第五章 5.1.1 中的电流路径理论可知分形贴片天线的表面电流路径更大，初始谐振频率更低，因此根据贴片天线小型化原理，可以通过将矩形贴片修改为分形形状来实现空气间隙式贴片天线传感器的小型化设计。

因此可以做出理论预测，将第三章中提出的 2 阶分形贴片应用于无应力贴片天线传感器，会使其初始谐振频率降低。

虽然应用分形贴片会降低传感器的初始谐振频率，但是由 6.2.1.1 中传感原理的公式推导可知，这种设计方法减小了传感模型中上层平行板电容的有效面积，由此可以推断这种设计方法可能会对传感过程产生影响。

规定分形贴片的面积为 A_1 ，则上层电容的有效面积也为 A_1 ，且与下层电容面积 A_2 的关系如下式 6.13 所示。

$$A_1 < A_2 \quad (6.13)$$

将这种关系代入式 6.3 至 6.5 可得下式 6.14 与 6.15。

$$C = \frac{\varepsilon'_{eff} A_2}{k d_1 + d_2} \quad (6.14)$$

$$k = \frac{A_2}{A_1} > 1 \quad (6.15)$$

其中, ε_{eff} 的计算公式如下式 6.16 所示。

$$\varepsilon'_{eff} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_1 d_2 + k \varepsilon_2 d_1} \quad (6.16)$$

重复式 6.7 至式 6.10 的推导过程, 可以得到分形贴片天线等效介电常数 ε'_{eff} 的计算公式如下式 6.17 所示。

$$\varepsilon'_{eff} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (t + \Delta)}{\varepsilon_r \varepsilon_0 \Delta + k \varepsilon_0 t} = \frac{\varepsilon (t + \Delta)}{(k t + \Delta \varepsilon_r)} \quad (6.17)$$

对比 ε'_{eff} 与 ε_{eff} 的计算公式可知, Δ 增加时, ε'_{eff} 的减小速度比 ε_{eff} 更慢。故对于空气间隙式分形贴片天线形变传感器的谐振频率 f' 而言, 由式 6.12 可知, 在 Δ 变化时, f' 的变化速度要小于矩形贴片形式传感器 f 的变化速度, 即应用分形贴片后的空气间隙式贴片天线形变传感器相对于矩形贴片形式, 其传感灵敏度会下降。

理论公式推导过程中无法定量判断灵敏度的下降程度, 故需要通过仿真模拟来初步确定, 如果下降程度十分微小, 那么应用分形贴片的小型化设计方法仍然具有可行性。

6.2.2 仿真分析

为了验证应用分形贴片的空气间隙式贴片天线形变传感器小型化设计方法的可行性, 通过对矩形和分形两种形式的形变传感器进行仿真建模分析, 比较两者的仿真结果, 分析得出结论。

6.2.2.1 HFSS 建模

在 HFSS 高频仿真软件中建立空气间隙式矩形贴片天线形变传感器与分形贴片天线传感器如图 6.8 所示。该传感模型中贴片天线的尺寸信息与第三章中的矩形贴片天线与 2 阶分形贴片天线一致。两种天线的基板材料均采用 RO3010 高频压合板, 其介电常数为 10.2 且保证仿真中环境温度恒定。为了测试两者的初始灵敏度与分析计算形变传感灵敏度, 设置两者的空气间隙层厚度为 HFSS 全局变量, 由于其有效传感范围为 0.2mm 至 1.1mm, 故设置其厚度遍历范围为 0.2mm-1.1mm, 步长为 0.1mm。所有天线整体均采用孔径耦合馈电方式, 为了模拟无限远处的天线辐射效应, 设置边界为 PML 辐射吸收边界, 降低算力需求; 由于金属作为良性导体, 平面波的趋肤深度很低, 天线的上辐射贴片、节点平面在仿真中采用无厚度平面, 并将边界设置为完美电壁 (Perfect E) 来对良性导

体平面进行模拟。

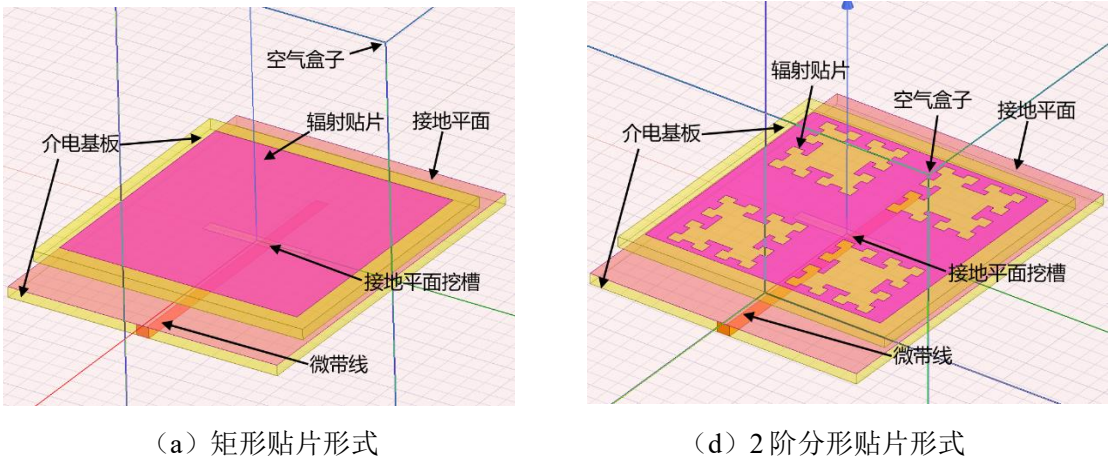


图 6.8 两种空气间隙式贴片形变传感器仿真中的模型图

6.2.2.2 模拟结果

根据仿真遍历计算得到的空气间隙厚度变化时两种贴片天线传感器的 S11 曲线数据，可以从中提取他们的谐振频率随空气间隙厚度的变化信息如表 6.5 所示。

表 6.5 仿真中两种空气间隙式贴片天线形变传感器谐振频率变化信息

空气间隙厚度 (mm)	矩形贴片天线 谐振频率 (GHz)	2 阶分形贴片天线 谐振频率 (GHz)
0.2	2.013	1.782
0.3	2.218	1.917
0.4	2.349	2.004
0.5	2.458	2.104
0.6	2.547	2.177
0.7	2.628	2.261
0.8	2.69	2.301
0.9	2.744	2.345
1.0	2.793	2.399
1.1	2.834	2.432

根据表 6.5 中两种贴片天线传感器的谐振频率信息可以得到两者的谐振频率与空气间隙厚度的关系如图 6.9 所示。

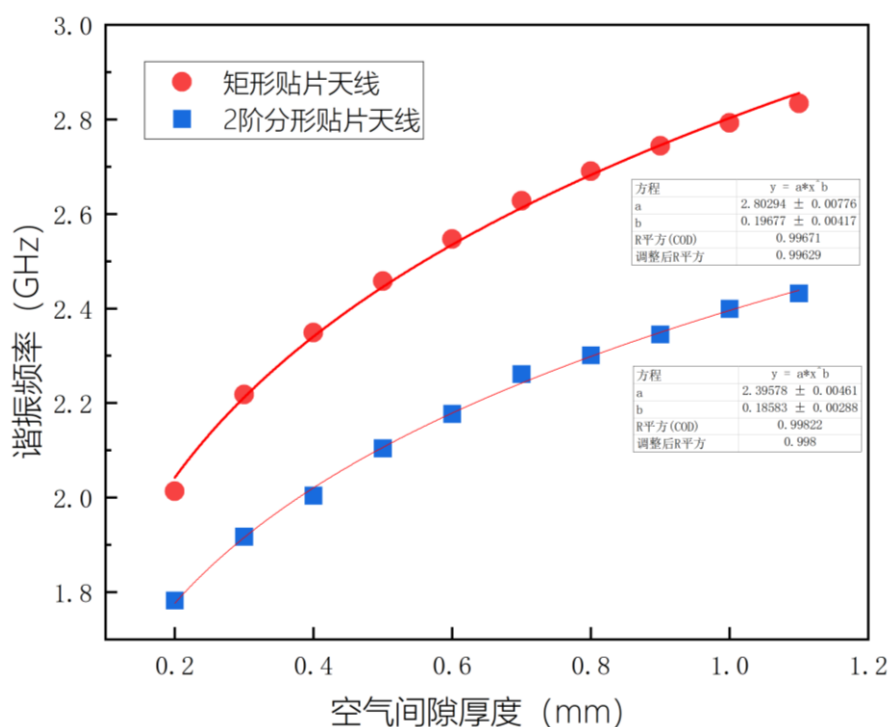


图 6.9 仿真中两种贴片天线传感器的谐振频率与空气间隙厚度变化关系图

由图 6.9 可知，空气间隙式 2 阶分形贴片天线形变传感器的初始谐振频率及传感工作时的谐振频率均小于矩形贴片天线传感器，故电流路径理论再一次得到验证且小型化设计方案的可行性也得到了初步验证。

对于两个天线各自的谐振频率与贴片相对位移的表征关系，矩形贴片天线呈现出非线性关系，曲线拟合的相关系数为 0.99629，分形贴片天线也呈现出非线性关系，曲线拟合的相关系数为 0.998。

定义空气间隙式贴片天线形变传感器的传感灵敏度 S 可由下式 6.18 计算得出。

$$S = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\Delta} \quad (6.18)$$

将表 6.5 中的数据代入式 6.18 可以得到矩形贴片天线形变传感器与 2 阶分形贴片天线形变传感器的形变传感灵敏度如下表 6.6 所示。

表 6.6 仿真中两种贴片天线形变传感器的传感灵敏度信息

天线类别	矩形贴片天线	2 阶分形贴片天线
形变传感灵敏度 (GHz/mm)	0.821	0.65
灵敏度下降率 (%)	/	20.83%

由表 6.6 可知，当空气间隙厚度在 0.1mm 至 1.1mm 的变化范围内，应用 2 阶分形贴片的空气间隙式贴片天线形变传感器的传感灵敏度相对于原矩形贴片形式下降了 20.83%，可知应用分形贴片的小型化设计方法对该空气间隙贴片传

传感器的灵敏度影响较小，在对传感器传感灵敏度性能要求不是非常高的应用场景下，这种小型化方法是完全可行的。

6.3 本章小结

本章将第三章提出的 2 阶分形贴片天线的表面贴片分形设计方法应用在了两种结构形变传感器上，基于此分别提出了无应力式贴片天线传感器的一种小型化增敏设计方法和空气间隙式贴片天线传感器的一种小型化方法。且给出了两种优化设计的详细理论推导，并完成了仿真模拟验证，与优化设计前的矩形贴片天线进行了对比，总结如下：

（1）在无应力式矩形贴片天线形变传感器上应用 2 阶分形贴片时，通过理论推导分析其传感过程中谐振频率的变化方式，初步推测这种方法可以实现该传感器的小型化增敏设计；随后，通过仿真模拟得出这种小型化增敏设计方法可以使传感器的谐振频率降低，并使其传感灵敏度提升近两倍，初步验证了该设计方法的可行性。但是在应用场景外的较大的监测范围时，该灵敏度提升效果相对较弱，且贴片相对位移与天线谐振频率传感关系变化为非线性关系。

（2）在空气间隙式矩形贴片天线形变传感器上应用 2 阶分形贴片时，通过理论推导分析其传感过程中谐振频率的变化方式，初步推测这种方法可以实现该传感器的小型化设计，但是作为小型化的代价，其传感灵敏度可能会降低；随后，通过仿真模拟得出这种小型化设计方法可以使传感器的谐振频率降低，并定量计算得出传感器的传感灵敏度会降低约五分之一，故可以验证针对一些传感灵敏度要求不高的应用场景，这种设计方法具有一定的可行性。

（3）对于本章提出的两种应用分形贴片设计方法的贴片天线传感器，其优化设计的方法仅在理论和仿真层面得到了合理地解释与验证。虽然理论和仿真结果的一致性良好，但是对于实际应用场景，这两种应用分形贴片的设计方法的实际可行性应当通过较为严谨完善的实验来验证，因为理论和仿真在设计和模拟中可能会对许多实际环境因素欠缺考虑，实验也往往会发现这些问题，通过解决这些问题，才能完善设计方案，完成方案实际可行性的验证。故在后续研究中应当考虑设计具体实验来验证本章中提出的两种设计方法。

第 7 章 温度对分形贴片天线的影响探究

环境温度的变化会引起贴片天线介电基板介电常数的变化以及辐射单元长度的变化，从而影响天线传感器的谐振频率。对于本文研究的利用自身谐振频率变化表征环境湿度变化的贴片天线湿度传感器，环境温度的变化会影响其谐振频率的变化，干扰传感效果，降低传感精度。

薛松涛等^[112]对无应力组合贴片天线传感器的温度性能进行了探究，较为系统地提出了贴片天线谐振频率受温度影响的基本原理，并通过仿真和实验的方法验证了这种影响，提出了无应力组合式贴片天线传感器的温度补偿方法。

本章将介绍贴片天线受温度影响的基本原理，并根据该原理定性判断温度变化对矩形贴片天线与第三章中提出的 2 阶分形贴片天线谐振频率的影响，并通过仿真模拟验证理论推测。最终通过对比两种贴片天线的仿真结果，初步得出温度对分形贴片天线的影响结论。

7.1 贴片天线谐振频率受温度影响基本原理

温度对贴片天线的谐振频率会产生影响，主要是因为温度变化会影响材料的物理特性。温度变化会影响天线基板的介电常数，同时温度升高还会导致天线膨胀，使天线的尺寸增加，从而导致谐振频率降低。温度的变化还会影响天线的金属部分的电导率，而金属的电导率会随着温度的升高而降低，这可能会影响天线的品质因数（Q 因子）和带宽，间接影响谐振频率。

根据式 5.1，可知贴片天线的谐振频率主要由基板介电常数变化以及有效长度尺寸决定，故本节中提出的贴片天线谐振频率受温度影响的基本原理主要考虑分析基板介电常数变化以及尺寸变化两大因素。

$$f = \frac{c}{2L_{\text{eff}}\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7.1)$$

7.1.1 热膨胀效应

环境温度变化时，贴片天线会发生变形，但是由于各层的热膨胀系数不同，各层层间会产生内力，导致层间协同变形。矩形贴片天线受温度影响的变形等效示意图如图 7.1 所示。

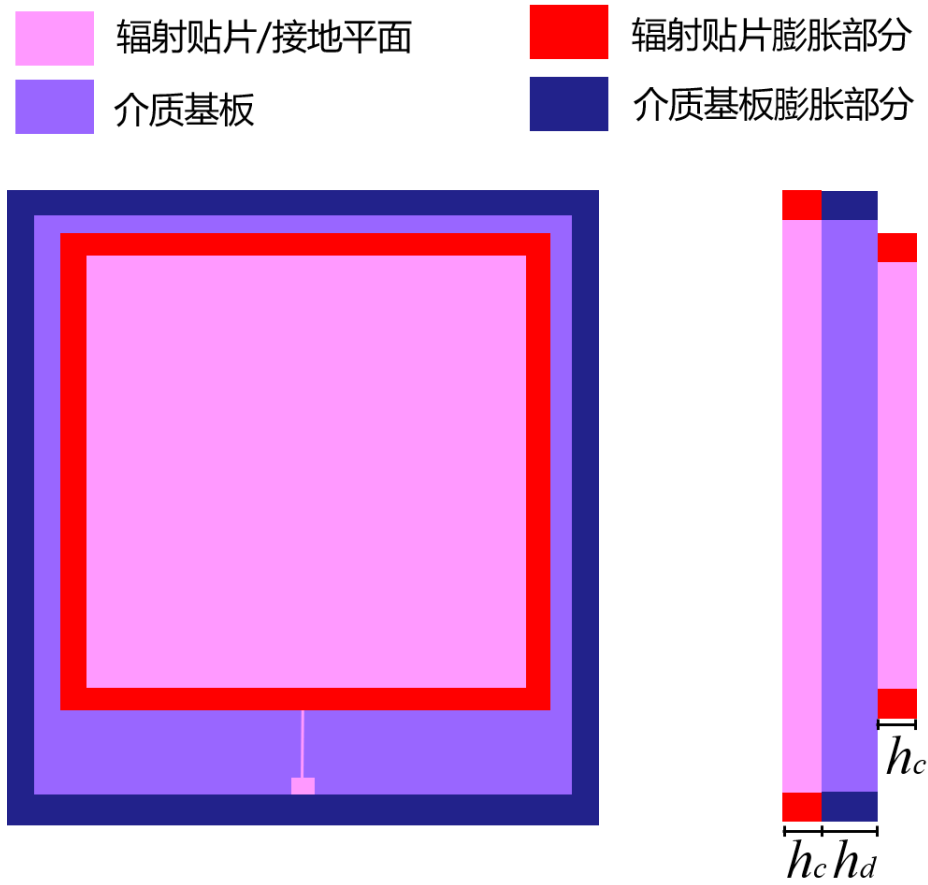


图 7.1 矩形贴片天线受温度影响变形示意图

当温度变化 ΔT 时，贴片天线在长度方向和宽度方向的尺寸变化可以用下式 7.1 和 7.2 计算。

$$\Delta L_T = \alpha_{leff} \Delta T \quad (8.1)$$

$$\Delta W_T = \alpha_{weff} \Delta T \quad (8.2)$$

其中， ΔL_T 是温度引起的辐射贴片长度方向的尺寸变化值， ΔW_T 是温度引起的辐射贴片宽度方向的尺寸变化。 α_{leff} 与 α_{weff} 分别为长度和宽度方向的等效膨胀系数，它们与组成天线的介质基板和辐射贴片的材料参数有关，具体关系如下式 7.3 和式 7.4 所示。

$$\alpha_{leff} = \frac{\alpha_{d,l} L_{eff} E_{d,l} h_d + 2\alpha_c L_{eff} E_c h_c}{2(E_{d,l} h_d + 2E_c h_c)} \quad (8.3)$$

$$\alpha_{weff} = \frac{\alpha_{d,w} W_e E_{d,w} h_d + 2\alpha_c W_e E_c h_c}{E_{d,w} h_d + 2E_c h_c} \quad (8.4)$$

其中， $\alpha_{d,l}$ 和 $\alpha_{d,w}$ 分别为介质基板在长度方向和宽度方向上的温度线膨胀系数， $E_{d,l}$ 和 $E_{d,w}$ 分别为介质基板在长度方向和宽度方向上的弹性模量， h_d 和 h_c 分别为基板和铜辐射贴片的厚度， α_c 和 E_c 分别为铜辐射贴片的温度线膨胀系

数和弹性模量。需要注意的是，天线介质基板通常不是各向同性的材料，其在长度方向与宽度方向上的弹性模量与温度线膨胀系数可能是不一致的。

7.1.2 基板介电常数受热变化

介质基板的相对介电常数是指在电场击穿介质时，介质所能容纳最大电荷能力的度量。随着温度的变化，介电基板材料的介电常数也会发生变化，这种变化关系可以由下式 7.5 表示。

$$\Delta\varepsilon_r = k\varepsilon_r\Delta T \quad (8.5)$$

其中， $\Delta\varepsilon_r$ 为天线介电常数受温度变化影响的改变量， k 为所选用的介电基板材料的介电常数温度漂移系数。且一般情况下，在温度变化范围不是很大时，介电常数温度漂移系数可以是做恒定不变。

7.1.3 矩形贴片天线在温度效应影响下的谐振频率

综合 7.1.1 与 7.1.2 的两种影响因素，对于矩形贴片天线，其受到环境温度变化影响时，谐振频率 f_T 的计算公式可以由式 7.1 与式 7.5 代入式 5.1 得到的式 7.6 表示。

$$f_T = \frac{c}{2(L_{eff} + \Delta L_T)\sqrt{\varepsilon_r + k\varepsilon_r\Delta T}} \quad (8.6)$$

由于理论计算较为复杂，且由于基板不是各向同性的材料，其变形沿长度方向和宽度方向是不均匀的，故需要通过模拟仿真进一步对贴片天线的温度影响效应进行测试。

7.1.4 分形贴片天线在温度效应影响下的谐振频率

对于第三章中提出的 2 阶分形贴片天线，由于其受温度影响变形情况更加复杂且不规律，故 7.1.1 中的矩形贴片天线的热膨胀效应导致的变形计算公式不再适用。对于 2 阶分形贴片天线，其受热膨胀的变形情况如图 7.2 所示。

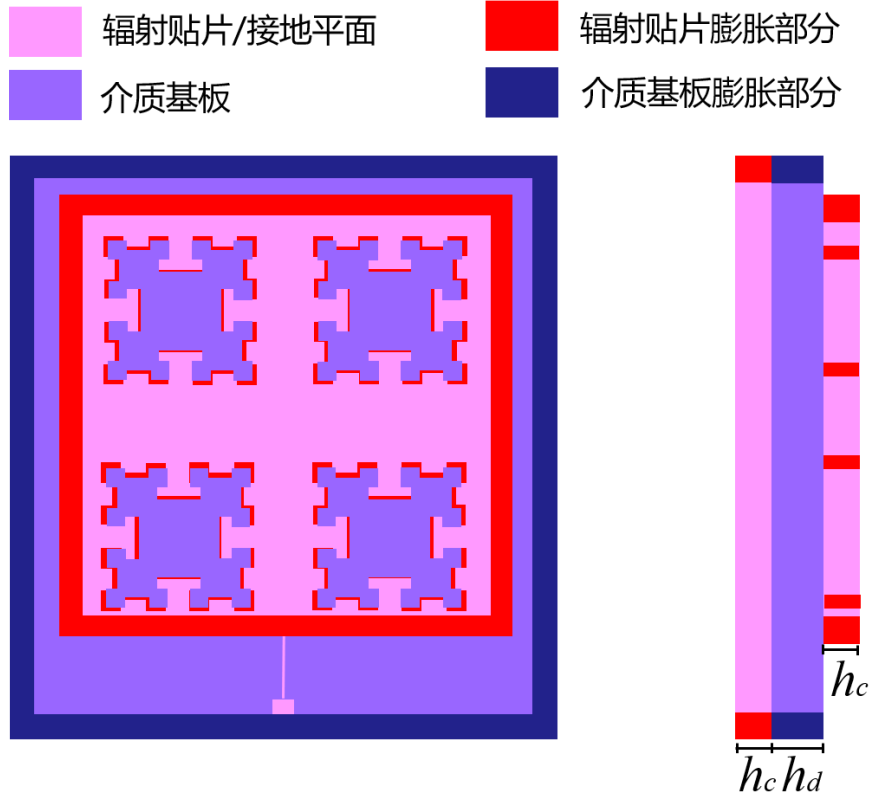


图 7.2 分形贴片天线受温度影响变形示意图

2 阶分形贴片天线的材料受热产生的形变对谐振频率的影响反映在其辐射贴片有效长度 L_{eff} 的变化上, 由于贴片形状的复杂性, 无法通过简单的计算方法得出有效长度受温度影响后的变化值。但由于 2 阶分形贴片天线的铜贴片面积小于原矩形贴片天线, 故根据式 7.7 所示的铜的面积热膨胀公式, 可以推测变化相同的环境温度, 2 阶分形贴片天线有效长度的变化值 $\Delta L'_T$ 小于矩形贴片天线有效长度的变化值 ΔL_T , 如式 7.8 所示。

$$\Delta S = 2S\alpha_c\Delta T \quad (8.7)$$

$$\Delta L'_T < \Delta L_T \quad (8.8)$$

其中, ΔS 为覆铜层在温度变化后的面积变化量, S 为覆铜层的原面积大小, α_c 为铜的热膨胀系数, ΔT 为温度变化量。

故由式 7.8 和温度影响下贴片天线谐振频率计算公式 7.6 可知, 相对于矩形贴片天线, 分形贴片天线受温度影响变化时, 材料膨胀对谐振频率的影响效果更弱, 而相对的, 基板介电常数变化对谐振频率的影响效果要更强。

实际上, 薛松涛等^[112] 曾在研究中指出, 对于单片贴片天线而言, 温度变化时, 基板介电常数变化的影响是天线谐振频率变化的主因。基于此, 可以推测只改变了表面覆铜形状的分形贴片天线, 相对于矩形贴片天线, 其谐振频率受温度影响效果可能会更加微弱, 因为其热膨胀效应更不明显; 但由于热膨

胀效应相对于基板介电常数的变化并不是主要影响因素，这种理论上的差异可能会由于基板介电常数更加明显的影响效果而被遮盖，故实际结果也可能显示2阶分形贴片天线受温度影响的效果与原矩形贴片天线几乎没有差别。

两种推测的关键主要取决于基板材料的性质，如果其介电常数温度漂移系数较大，那么两种天线谐振频率受温度影响的效果的差异可能不大，但如果该系数较小，两种天线可能会存在较为明显的差异。

7.2 温度对分形贴片天线影响模拟

由于矩形贴片天线与2阶分形贴片天线受温度影响时的谐振频率的理论计算较为复杂，且由于基板变形沿长度方向和宽度方向不均匀，需要借助仿真软件进行模拟测试。

在本节中，利用 HFSS 高频仿真软件对矩形贴片天线与2阶分形贴片天线在环境温度变化的情况下进行了建模与模拟测试，通过对温度参数进行遍历计算，初步确定了两种天线在温度变化时谐振频率的变化情况，也初步验证了7.1中贴片天线温度效应的相关理论。

7.2.1 HFSS 建模

在 HFSS 中建立如下图 7.3 所示的矩形贴片天线与2阶分形贴片天线的电磁仿真模型，该模型与第五章 5.2.3 中贴片天线湿度传感器模型的所有材料参数与尺寸参数完全相同，但对于该模型的环境参数，设置其环境温度从 0°C 变化到 50°C ，变化步长为 5°C ，并利用 HFSS 全局变量对基板介电常数与铜贴片的尺寸变化进行变量设置，其中，基板采用 RT5880 高频压合板，其介电常数为 2.2，介电常数温度漂移系数为 $-125\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ 。

两种天线均采用平面波馈电，为了模拟无限远处的天线辐射效应，设置边界为 PML 辐射吸收边界，降低算力需求；由于金属作为良性导体，平面波的趋肤深度很低，天线的上辐射贴片、节点平面在仿真中采用无厚度平面，并将边界设置为完美电壁（Perfect E）来对良性导体平面进行模拟。

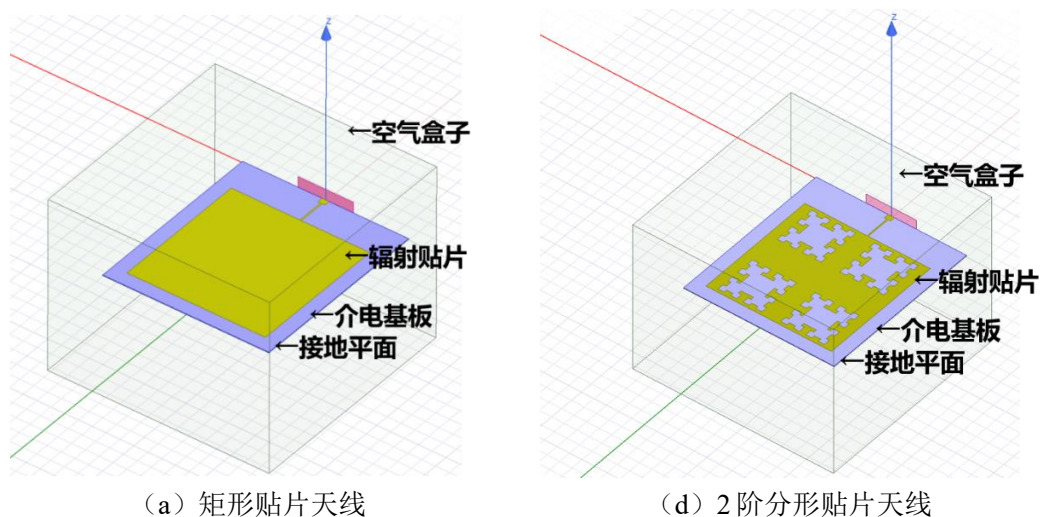


图 7.3 温度效应仿真中的贴片天线

模拟测试完毕后，可以根据仿真中温度参数遍历计算得出两种贴片天线的 S11 曲线数据，提取出他们各自在温度变化时的谐振频率信息。

7.2.2 模拟结果

根据仿真计算得到的两种贴片天线的 S11 曲线信息，可以从中提他们随温度变化的谐振频率信息如表 7.1 所示。

表 7.1 仿真中两种天线谐振频率随环境温度变化情况

环境温度 ($^{\circ}\text{C}$)	矩形贴片天线 谐振频率 (GHz)	2 阶分形贴片天线 谐振频率 (GHz)
0	1.94	1.601
5	1.94	1.601
10	1.94	1.602
15	1.941	1.602
20	1.942	1.603
25	1.942	1.603
30	1.943	1.603
35	1.943	1.604
40	1.944	1.604
45	1.944	1.604
50	1.945	1.605

根据表 7.1 的数据，可以分别绘制矩形贴片天线与 2 阶分形贴片天线的谐振

频率与温度变化关系散点图并对数据点进行线性拟合如图 7.4 和图 7.5 所示。

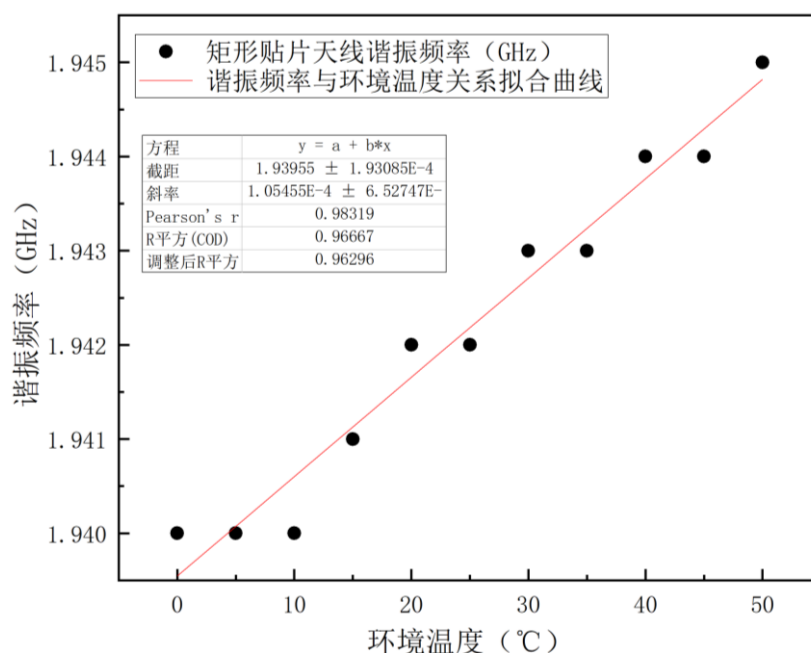


图 7.4 矩形贴片天线谐振频率与温度变化关系图

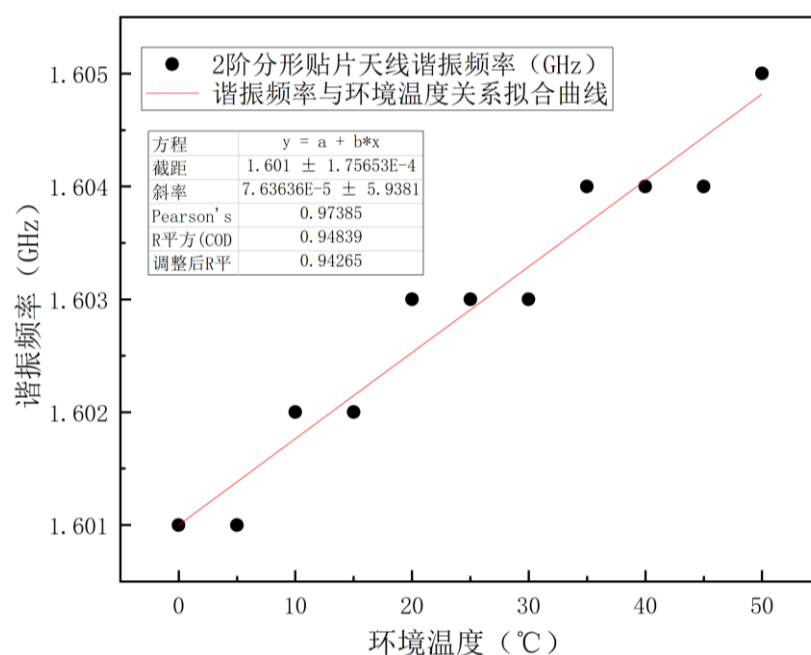


图 7.5 2 阶分形贴片天线谐振频率与温度变化关系图

由图 7.4 和图 7.5 可知，温度效应对 RT5880 基板的两种贴片天线谐振频率的影响是十分微弱的，且在 0 至 50℃ 温度变化范围内，温度与贴片天线谐振频率的变化关系是基本符合线性规律的，拟合所得线性曲线的线性拟合系数均高于 0.94，线性关系良好。

贴片天线谐振频率受温度影响的灵敏度 S 计算公式如下式 7.9 所示。

$$S = \frac{f_{max} - f_{min}}{\Delta T} \quad (8.9)$$

将表 7.1 中的数据代入式 7.9 可以得到矩形贴片天线与 2 阶分形贴片天线谐振频率受温度影响的灵敏度如下表 7.2 所示。

表 7.2 仿真中两种贴片天线谐振频率受温度影响的灵敏度信息

天线类别	温度灵敏度 (GHz/°C)
矩形贴片天线	0.005
2 阶分形贴片天线	0.004

由表 7.2 中两种贴片天线谐振频率受温度影响的灵敏度结果可知，在基板材料一致的情况下，2 阶分形贴片天线谐振频率受温度影响的灵敏度小于矩形贴片天线，但该差距十分微小，可以归为误差量级，故可知 2 阶分形贴片天线谐振频率受温度影响效果基本与矩形贴片天线一致。因此，本章 7.1 中分形贴片天线的热膨胀效应造成的天线有效长度变化小于矩形贴片天线的理论也在仿真中得到了初步验证，除此之外，仿真结果也验证了贴片天线谐振频率随温度变化的主要影响因素是基板介电常数的热变效应，热膨胀效应的影响与其相比非常小。

7.3 本章小结

本章对第三章提出的可以用于湿度传感的 2 阶分形贴片天线的温度效应进行了理论设计和模拟仿真验证，并与矩形贴片天线进行了对比，总结如下：

(1) 介绍了矩形贴片天线在温度变化时导致其谐振频率变化的主要影响因素及温度与其谐振频率的函数关系，并在此基础上定性分析了 2 阶分形贴片天线的温度效应的相关影响因素及其对天线谐振频率的作用效果，并与矩形贴片天线进行了比较。

(2) 通过仿真手段对两种贴片天线进行了模拟仿真。仿真结果显示 2 阶分形贴片天线谐振频率受温度影响效果基本与矩形贴片天线一致，略微低于矩形贴片天线，初步验证了 2 阶分形贴片天线温度效应的理论推测，同时也验证了贴片天线的温度效应中，起控制作用的是基板介电常数的热变效应。

(3) 由于本章的研究对象是本文提出的应用 RT5880 基板的贴片天线，RT5880 的介电常数温度漂移系数既没有高性能热稳定材料低 (-100ppm/°C)，也没有一些温度敏感的复合材料高 (+5000ppm/°C)，故如果利用这些材料作为基板进行仿真模拟或实验，其得到的数据理论上应该比本章仿真得到的数据精度更高、规律性更强，验证效果更好，在后续的研究中可以考虑尝试探究。

第8章 结论与展望

8.1 结论

本文首先研究了贴片天线湿度传感器的传感原理以及增敏机制，并提出了一种湿度增敏的分形设计方法，通过该方法设计了三个性能逐渐提升的分形贴片天线，以监测水泥凝结时间为具体应用场景进行了模拟和实验验证。随后，在增敏设计方法的基础上，较为系统地研究了分形贴片天线的小型化原理，提出了湿度增敏的小型化设计方法与湿度退敏的小型化设计方法，并完成了仿真与实验验证；最后，通过理论设计与仿真验证的方法研究了无应力式与空气间隙式两种传感原理不同的贴片天线形变传感器的小型化增敏机制并探究了温度对分形贴片天线的影响。

本文的主要研究工作及结论如下：

（1）介绍了贴片天线理论分析的基本模型——谐振腔假定，并基于谐振腔假定分析了典型矩形贴片天线的谐振频率计算公式及其影响因素，为贴片天线小型化增敏的分形设计方法奠定了理论基础。

（2）介绍了贴片天线湿度传感模型，提出了贴片天线的边缘长度理论，提出了一种类闵可夫斯基 X 分形的分形形式；基于以上理论基础，提出了一种理论上可以实现传感器灵敏度提升的基于类闵可夫斯基 X 分形的分形贴片天线设计方案。

（3）提出了利用贴片天线传感器监测水泥凝结时间的实际传感应用场景，对分形贴片天线进行了水泥凝结时间监测仿真模拟和实验，仿真与实验结果以及理论预测基本一致，即增加分形贴片天线传感器的分形阶数，其湿度感知灵敏度会提升，其中，2阶分形贴片天线的灵敏度提升了近一倍，验证了该传感灵敏度增敏设计方案的可行性，同时也验证了理论的正确性。

（4）对贴片天线的小型化原理及方法进行了系统的研究，提出了电流路径理论与小型化原理，并从理论上分析了类闵可夫斯基 X 分形贴片天线传感器的小型化设计可行性，对分形贴片天线进行了初始谐振频率测试仿真模拟和实验，仿真与实验结果基本一致，即增加分形贴片天线传感器的分形阶数，其初始谐振频率会降低，因此在同一工作频率下天线的尺寸也会缩减，该湿度增敏的小型化设计方案的可行性以及小型化相关理论的正确性得到验证；根据孔洞位置理论与解耦设计原理，提出了带有中部孔洞的分形贴片天线传感器湿度退敏小

型化设计方法, 并进行了初始谐振频率测试以及传感灵敏度测试仿真模拟和实验, 结果均一致显示中部矩形孔洞的边长增加, 分形贴片天线传感器的谐振频率会继续下降, 传感灵敏度会略微减少, 该结果验证了孔洞位置理论和解耦设计原理的正确性, 验证了带有中部矩形孔洞的分形贴片天线传感器的小型化设计方法的可行性, 即分形贴片天线传感器在分形阶数较大时, 可以保证传感灵敏度基本不变并实现湿度退敏的小型化设计。

(5) 介绍了无应力式贴片天线传感器与空气间隙式传感器, 从传感原理上推导了两者应用分形贴片后传感器谐振频率以及传感灵敏度的变化, 通过仿真软件对两种传感器进行了模拟, 仿真结果与理论一致, 即应用分形贴片后, 无应力式贴片天线传感器初始谐振频率降低, 传感灵敏度在工作范围内提升近两倍; 而空气间隙式贴片天线的初始谐振频率降低, 传感灵敏度也降低了约五分之一, 相对不明显; 由此验证了通过对两种传感器应用分形贴片实现优化设计的可行性。

(6) 介绍了矩形贴片天线在温度效应的基本原理, 定性分析了 2 阶分形贴片天线的温度效应的相关影响因素及其对天线谐振频率的作用效果, 通过仿真软件对两种贴片天线进行了模拟, 仿真结果与理论一致, 2 阶分形贴片天线谐振频率受温度影响效果基本与矩形贴片天线一致, 略微低于矩形贴片天线, 分形贴片天线的热膨胀效应相对矩形贴片天线较弱, 但贴片天线的温度效应中, 起控制作用的是基板介电常数的热变效应。

基于上述工作, 可总结以下几点结论:

(1) 贴片天线的谐振频率主要由贴片天线的有效长度以及等效介电常数决定, 可以通过将需要监测的变化参数与有效长度与等效介电常数建立联系关系, 设计出多种传感功能的贴片天线传感器。对于贴片天线传感器, 降低其谐振频率可以实现传感器的小型化, 放大或缩小与传感参数关联的贴片天线有效长度或等效介电常数, 可以提升传感器的传感灵敏度。

(2) 修改贴片天线的表面贴片的形状会改变贴片天线的有效长度, 也可能在传感模型中对贴片天线的有效长度或等效介电常数产生放大或缩小效果, 从而降低贴片天线的谐振频率并可能会提升其传感灵敏度, 根据传感原理的不同, 部分传感器的传感灵敏度也可能降低。同时, 谐振频率的降低与灵敏度的提升可能是互相耦合的, 根据传感模型的不同, 在贴片表面的不同位置开洞或刻槽可能可以从设计层面实现谐振频率降低与灵敏度提升的解耦。

(3) 相比于矩形贴片天线, 温度对分形贴片天线的热膨胀效应更加微弱, 且相对热膨胀效应, 基板介电常数的热变效应才是影响天线谐振频率变化的主导因素, 热膨胀效应本身对天线谐振频率的影响非常非常微小。

(4) 分形形状的复杂程度会随着其迭代次数的提升而增加,且高度的空间填充率以及自相似性也导致其边缘长度比一般的图案形状要大。将分形图案应用于贴片天线传感器,将辐射贴片的形状变为分形形状,可以较为明显地增加贴片天线的边缘长度,从而提升其有效长度甚至对传感模型中的等效介电常数产生影响,由此实现贴片天线谐振频率的产生明显下降,灵敏度也可能发生提升(或下降)。

8.2 展望

分形拓扑与贴片天线的有无穷无尽的组合方式,依次可以设计出适用于多种工作场景的贴片天线,因此分形天线与分形拓扑设计方法的研究潜力巨大,应用前景也十分广阔。本文仅对一种分形设计方法进行了研究,但该方法在多个应用场景下均实现了天线传感器的优化设计。在研究过程中,由于时间、自身水平以及实际试验条件等诸多客观条件的限制,本文提出的工作仍然有很多不足之处可以进一步完善,总结为以下几点:

(1) 在贴片天线传感器的小型化增敏设计中,本文采用的分形形式是通过穷举尝试多种分形拓扑形式后根据性能提升情况择优选择的,由于算力不足,无法对分形拓扑的形式进行规律性的遍历优化,故本文提出的小型化增敏设计方案本身并不一定是最优方案,且对设计方法本身的研究有待进一步完善。

(2) 本文中根据已有的理论基础所提出的针对性的应用理论以及设计原理,均是较为模糊的,仅从公式或简略的等效模型在定性的层面完成了理论的推导和后续研究的预测,没有定量分析以及严谨完整、适用度较高的理论框架,后续的研究中可以进一步由点到面得完善提出的应用理论及设计原理。

(3) 对于本文中所有提出过小型化设计方案的贴片天线,都是从验证其谐振频率降低的角度出发说明其小型化的可行性,并没有设计出尺寸缩减之后的小型化天线并对其谐振频率以及其他工作性能进行仿真和实验测试验证,小型化研究尚未闭环,在后续的研究中应当完成最后的验证环节。

(4) 对于本文第六章和第七章中两种形变传感器优化设计和分形贴片天线温度效应的研究也缺乏实验验证部分,应当在后续的研究中设计并完成实验。

(5) 在本文所有实验中,对天线谐振频率的测试方法均采用有线问询方式,并没有设计完成无线问询方式的实验,因此对于本文中提出的天线传感器,其无线监测情况下的具体工作性能有待继续检测探讨,在后续的研究中应当设计完成无线问询方式的实验。

参考文献

- [1] Chadha, M., Hu, Z., & Todd, M. (2021). An alternative quantification of the value of information in structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 21, 138
- [2] Montalvão, D., Maia, N., & Ribeiro, A. (2006). A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials. *The Shock and Vibration Digest*, 38, 295-324.
- [3] 汤东婴,魏晓斌,孙正华 & 王若晨.(2023).结构健康监测系统综述研究.智能建筑与智慧城市(08),6-11.doi:10.13655/j.cnki.ibci.2023.08.001.
- [4] Lu, W., Teng, J., Zhou, Q., & Peng, Q. (2018). Stress Prediction for Distributed Structural Health Monitoring Using Existing Measurements and Pattern Recognition. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18.
- [5] Ni, Y., & Xia, Y. (2016). Strain-Based Condition Assessment of a Suspension Bridge Instrumented with Structural Health Monitoring System. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 16, 1640027.
- [6] Adewuyi, A., Wu, Z., & Serker, N. (2009). Assessment of Vibration-based Damage Identification Methods Using Displacement and Distributed Strain Measurements. *Structural Health Monitoring*, 8, 443 - 461.
- [7] Xia, Q., & Liu, H. (2018). Multi-axis dynamic displacement measurement based on a strain sensor structure. *Sensors and Actuators A-physical*, 272, 62-74.
- [8] Trichias, K., Pijpers, R., & Meeuwissen, E. (2014). A new approach for structural health monitoring by applying anomaly detection on strain sensor data. , 9064.
- [9] Handawi, K., Vahdati, N., Rostron, P., Lawand, L., & Shiryayev, O. (2016). Strain based FBG sensor for real-time corrosion rate monitoring in pre-stressed structures. *Sensors and Actuators B-chemical*, 236, 276-285.
- [10] Yarnold, M., & Moon, F. (2015). Temperature-based structural health monitoring baseline for long-span bridges. *Engineering Structures*, 86, 157-167.
- [11] Hui-cai, X. (2009). A New Technology for Structural Health Monitoring: Smart Sensor Networks. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering*.
- [12] 王立新,郭凰,杨佳宇,李爽,李储军 & 汪珂.(2023).无线通信在结构健康监测系统的应用研究综述.科学技术与工程(06),2229-2241.
- [13] Abdulkarem, M., Samsudin, K., Rokhani, F., & Rasid, M. (2019). Wireless sensor network for structural health monitoring: A contemporary review of technologies, challenges, and future direction. *Structural Health Monitoring*, 19, 693 - 735.
- [14] Jang, S., Kim, D., & Kim, J. (2011). Investigation of dipole antenna based sensor for passive wireless structural health monitoring. , 7980.
- [15] Mirshahi, S., Aliakbar, A., & Uysal, S. (2015). Implementation of structural health monitoring based on RFID and WSN. 2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 1318-1323.

- [16] Gianvittorio, J., & Rahmat-Samii, Y. (2002). Fractal antennas: a novel antenna miniaturization technique, and applications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 44, 20-36.
- [17] Adnan, S., Asthana, P., Singh, P., Mishra, S., & Siddiqui, M. (2016). Introduction to Fractal Antenna. *International journal on innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering*, 4, 152-155.
- [18] Cohen, N. (1997). Fractal antenna applications in wireless telecommunications. *Professional Program Proceedings. Electronic Industries Forum of New England*, 43-49.
- [19] Ahmed, M., & Ahmed, M. (2018). Fractal Antennas for Wearable Applications. *Fractal Analysis*.
- [20] Panoutsopoulos, B. (2003). Printed circuit fractal antennas. 2003 IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2003. ICCE., 288-289.
- [21] Werner, D., & Gangul, S. (2003). An overview of fractal antenna engineering research. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45, 38-57.
- [22] Taheri, S. (2019). A review on five key sensors for monitoring of concrete structures. *Construction and Building Materials*.
- [23] Haq, M., Armghan, A., Aliqab, K., & Alsharari, M. (2023). A Review of Contemporary Microwave Antenna Sensors: Designs, Fabrication Techniques, and Potential Application. *IEEE Access*, 11, 40064-40074.
- [24] Scuro, C., Sciammarella, P., Lamonaca, F., Olivito, R., & Carní, D. (2018). IoT for structural health monitoring. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 21, 4-14.
- [25] Cheng, H., Ebadi, S., & Gong, X. (2012). A Low-Profile Wireless Passive Temperature Sensor Using Resonator/Antenna Integration Up to 1000°C. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 369-372.
- [26] Fargeot, S., Guihard, D., & Lahitte, P. (2011, May). Dielectric characterization at high temperature (1600° C) for space applications. In 2011 IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics (pp. 48-50). IEEE.
- [27] Yi, X., Vyas, R., Cho, C., Fang, C., Cooper, J., Wang, Y., Leon, R., & Tentzeris, M. (2012). Thermal effects on a passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing. , 8345.
- [28] Sanders, J. W., Yao, J., & Huang, H. (2015). Microstrip patch antenna temperature sensor. *IEEE sensors journal*, 15(9), 5312-5319.
- [29] Zhang, J., Li, C., Gao, Y., Tan, J., Xuan, F., & Ling, X. (2022). Flexible multimode antenna sensor with strain and humidity sensing capability for structural health monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 347, 113960.
- [30] Tchafa, F. M., & Huang, H. (2018). Microstrip patch antenna for simultaneous strain and temperature sensing. *Smart Materials and Structures*, 27(6), 065019.
- [31] Yi, Z., Xue, S., Xie, L., Wan, G., & Wan, C. (2023). Detection of Setting Time During Cement Hydration Using Multielectromagnetic Parameters of Patch Antenna Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72, 1-9.
- [32] 罗尧治 & 赵靖宇.(2022).空间结构健康监测研究现状与展望.建筑结构学报(10),16-28.
doi:10.14006/j.jzjgxb.2022.0070.
- [33] Yi, X., Cho, C., Cooper, J., Wang, Y., Tentzeris, M., & Leon, R. (2013). Passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing—electromagnetic modeling, simulation, and testing. *Smart Materials and Structures*, 22.

-
- [34] Wan, G., Li, M., Yang, Y., Xie, L., & Chen, L. (2021). Patch-Antenna-Based Structural Strain Measurement Using Optimized Energy Detection Algorithm Applied on USRP. *IEEE Internet of Things Journal*, 8, 7476-7484.
 - [35] Lee, D. J., & Jang, M. S. (2009). Optimal spectrum sensing time considering spectrum handoff due to false alarm in cognitive radio networks. *IEEE Communications Letters*, 13(12), 899-901.
 - [36] Seshukumar, K., Saravanan, R., & Suraj, M. S. (2013, January). Spectrum sensing review in cognitive radio. In *2013 International Conference on Emerging Trends in VLSI, Embedded System, Nano Electronics and Telecommunication System (ICEVENT)* (pp. 1-4). IEEE.
 - [37] Lopato, P., & Herbko, M. (2018). A circular microstrip antenna sensor for direction sensitive strain evaluation. *Sensors*, 18(1), 310.
 - [38] Meyer, M. L. (1968). On a general method of compensation in strain gauge work. *Strain*, 4(1), 3-8.
 - [39] Zhang, B., Lyu, Y., & Lee, Y. (2022). Passive wireless strain and crack sensing using a RFID-based patch antenna. *Journal of Physics: Conference Series*, 2198.
 - [40] Xue, S., Xu, K., Xie, L., & Wan, G. (2019). Crack sensor based on patch antenna fed by capacitive microstrip lines. *Smart Materials and Structures*, 28(8), 085012.
 - [41] Caizzone, S., & DiGiampaolo, E. (2015). Wireless passive RFID crack width sensor for structural health monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 15(12), 6767-6774.
 - [42] Aladadi, Y., & Alkanhal, M. (2020). Classification and characterization of electromagnetic materials. *Scientific Reports*, 10.
 - [43] Huang, H., & Skilskyj, J. (2019). Flexible textile antenna sensor for bio-impedance sensing. , 10970, 1097019 - 1097019-8.
 - [44] Koga, T., & Fukusako, T. (2017). A design of sensor antenna for non-destructive testing. 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), 179-181.
 - [45] Saghlatoon, H., Mirzavand, R., Honari, M., & Mousavi, P. (2018). Sensor Antenna Transmitter System for Material Detection in Wireless-Sensor-Node Applications. *IEEE Sensors Journal*, 18, 8812-8819.
 - [46] Colegrave, K., Jain, M. C., Niksan, O., & Zarifi, M. (2022, July). Artificial neural networks for antenna-based contactless liquid classification. In *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)* (pp. 1-5). IEEE.
 - [47] Kazemi, K. K., Zarifi, T., Mohseni, M., Narang, R., Golovin, K., & Zarifi, M. H. (2021). Smart superhydrophobic textiles utilizing a long-range antenna sensor for hazardous aqueous droplet detection plus prevention. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(29), 34877-34888.
 - [48] Jun, S. Y., Izquierdo, B. S., & Parker, E. A. (2019). Liquid sensor/detector using an EBG structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(5), 3366-3373.
 - [49] De Castro Lima, A. C., Parker, E. A., & Langley, R. J. (1994). Tunable frequency-selective surface using liquid substrates. *Electronics letters*, 30(4), 281-282.
 - [50] Mandelbrot, B. B., & Mandelbrot, B. B. (1982). *The fractal geometry of nature* (Vol. 1, pp. 25-74). New York: WH freeman.
 - [51] Mandelbrot, B. B. (1989). *Fractal geometry: what is it, and what does it do?*. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 423(1864), 3-16.

-
- [52] Steemson, K., & Williams, C. (2018). Generalised sierpinski triangles. arXiv preprint arXiv:1803.00411.
 - [53] Xu, T., Moore, I. D., & Gallant, J. C. (1993). Fractals, fractal dimensions and landscapes—a review. *Geomorphology*, 8(4), 245-262.
 - [54] Weisstein, E. W. (2008). Koch snowflake. <https://mathworld.wolfram.com/>.
 - [55] Goodchild, M. F., & Mark, D. M. (1987). The fractal nature of geographic phenomena. *Annals of the Association of American Geographers*, 77(2), 265-278.
 - [56] Branner, B. (1989). The mandelbrot set. In *Proc. symp. appl. math* (Vol. 39, pp. 75-105).
 - [57] Bell, J. *The Sierpinski Triangle: An Aesthetically Pleasing Limit Point* (Doctoral dissertation, Dissertation).
 - [58] Sathiyamoorthy, R. D., Tharaniya, P., Senthil, S., & Jayalalitha, G. (2021). Computation of Dominance Sets in Koch Snowflake. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 25(6), 13047-13050.
 - [59] Žubrinić, D. (2005). Analysis of Minkowski contents of fractal sets and applications.
 - [60] Skilling, J. (2004, April). Using the Hilbert curve. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 707, No. 1, pp. 388-405). American Institute of Physics.
 - [61] Tabachnikov, S. (2014). Dragon curves revisited. *The Mathematical Intelligencer*, 36, 13-17.
 - [62] Aarts, J. M., & Oversteegen, L. G. (1993). The geometry of Julia sets. *Transactions of the American Mathematical Society*, 338(2), 897-918.
 - [63] Anguera, J., Andújar, A., Jayasinghe, J., Chakravarthy, V. S., Chowdary, P. S. R., Pijoan, J. L., ... & Cattani, C. (2020). Fractal antennas: An historical perspective. *Fractal and Fractional*, 4(1), 3.
 - [64] Cohen, N. (1997, May). Fractal antenna applications in wireless telecommunications. In *Professional program proceedings. electronic industries forum of New England* (pp. 43-49). IEEE E.
 - [65] Werner, D. H., & Ganguly, S. (2003). An overview of fractal antenna engineering research. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45(1), 38-57.
 - [66] Encarnação, J. L., Peitgen, H. O., Sakas, G., & Englert, G. (Eds.). (2012). *Fractal geometry and computer graphics*. Springer Science & Business Media.
 - [67] Etherington, T. R. (2022). Perlin noise as a hierarchical neutral landscape model. *Web Ecology*, 22(1), 1-6.
 - [68] Kalda, J. (1993). Fractal model of blood vessel system. *Fractals*, 1(02), 191-197.
 - [69] Sedivy, R. (1996). Fractal tumours: their real and virtual images. *Wiener Klinische Wochenschrift*, 108(17), 547-551.
 - [70] Jayalalitha, G., Deviha, V. S., & Uthayakumar, R. (2008). Fractal model for blood flow in cardiovascular system. *Computers in Biology and Medicine*, 38(6), 684-693.
 - [71] Gao, J., & Xia, Z. G. (1996). Fractals in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 20(2), 178-191.
 - [72] Dauphiné, A. (2013). *Fractal geography*. John Wiley & Sons.
 - [73] Blackledge, J., & Lamphiere, M. (2021). A review of the fractal market hypothesis for trading and market price prediction. *Mathematics*, 10(1), 117.
 - [74] Sala, N. (2004). Fractal geometry in the arts: An overview across the different cultures. *Thinking In Patterns*, 177-188.

- [75] 李道铁. (2014). 分形天线技术与设计研究 (Doctoral dissertation, 上海: 上海交通大学).
- [76] Yu, Z. W., Wang, G. M., Gao, X. J., & Lu, K. (2010). A novel small-size single patch microstrip antenna based on Koch and Sierpinski fractal-shapes. *Progress in Electromagnetics research letters*, 17, 95-103.
- [77] Sedghi, M. S., Naser-Moghadasi, M., & Zarrabi, F. B. (2016). A dual band fractal slot antenna loaded with Jerusalem crosses for wireless and WiMAX communications. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 61, 19-24.
- [78] Sharma, C., & Vishwakarma, D. K. (2016). Miniaturization of spiral antenna based on Fibonacci sequence using modified Koch curve. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 932-935.
- [79] Saidatu, N. A., Soh, P. J., Sun, Y., Lauder, D., & Azremi, A. A. H. (2010, September). Multiband and fractal PIFA (planar inverted F antenna) for mobile phones. In *2010 7th International Symposium on Wireless Communication Systems* (pp. 671-675). IEEE.
- [80] Werner, D. H., Haupt, R. L., & Werner, P. L. (1999). Fractal antenna engineering: The theory and design of fractal antenna arrays. *IEEE Antennas and propagation Magazine*, 41(5), 37-58.
- [81] Dahl, C., Vogt, M., & Rolfes, I. (2021). A MIMO radar system based on fractal antenna arrays for level measurement applications. *Advances in Radio Science*, 19, 23-29.
- [82] Siakavara, K. (2010). Hybrid-fractal direct radiating antenna arrays with small number of elements for satellite communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(6), 2102-2106.
- [83] Lin, B., Lin, C., Mao, Y., Chen, Z., Zhang, P., Cai, Y., ... & Zhang, Y. (2016, July). Design of Terahertz Waveband Antenna Based on Fractal Photonic Crystal Structure. In *2016 2nd International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (AEECE 2016)* (pp. 68-72). Atlantis Press.
- [84] Hong, J. T., Jun, S. W., Cha, S. H., Park, J. Y., Lee, S., Shin, G. A., & Ahn, Y. H. (2018). Enhanced sensitivity in THz plasmonic sensors with silver nanowires. *Scientific reports*, 8(1), 15536.
- [85] Yeo, J., & Lee, J. I. (2019, December). Sensitivity Enhancement of Microstrip Patch Sensor Antenna Using Radiating-edge Slot. In *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall)* (pp. 2951-2959). IEEE.
- [86] Sasagawa, K., & Tsuchiya, M. (2006). Modulation depth enhancement for highly sensitive electro-optic RF near-field measurement. *Electronics Letters*, 42, 1357-1358.
- [87] Ikonen, P. M., Rozanov, K. N., Osipov, A. V., Alitalo, P., & Tretyakov, S. A. (2006). Magneto dielectric substrates in antenna miniaturization: Potential and limitations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(11), 3391-3399.
- [88] Judy, J. W. (2001). Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications. *Smart materials and Structures*, 10(6), 1115.
- [89] Abd El-Hameed, A. S., Afifi, A. I., Darwish, M. A., & Alex, T. (2022). Nanomaterials for Antenna Applications. In *Synthesis and Applications of Nanoparticles* (pp. 297-318). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [90] Dong, Y., & Itoh, T. (2012). Metamaterial-based antennas. *Proceedings of the IEEE*, 100(7), 2271-2285.

- [91] Lu, H., Xu, X., & Sun, F. (2021). Miniaturized UHF Band Microstrip Antenna Designed with Spiral Metamaterial Inclusions. 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), 1-2.
- [92] Navarro, J. A., Hummer, K. A., & Chang, K. (1991). Active integrated antenna elements. *Microwave journal*, 34(1), 115-123.
- [93] Shi, S., Che, W., Yang, W., & Xue, Q. (2015). Miniaturized Patch Antenna With Enhanced Bandwidth Based on Signal-Interference Feed. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 281-284.
- [94] Pfeiffer, C. (2016). Fundamental Efficiency Limits for Small Metallic Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65, 1642-1650.
- [95] Fallahpour, M., & Zoughi, R. (2018). Antenna Miniaturization Techniques: A Review of Topology- and Material-Based Methods. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 60, 38-50.
- [96] Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons.
- [97] 何厅厅. 麦克斯韦电路在天线及微带电路中的初步应用[D]. 东南大学,2011.
- [98] 吴孟齐, 吴纬, 魏玉兰. 高等电磁学基础[M]. 学林出版社,2009.
- [99] 高建平. 电磁波工程基础:电磁理论基础·微波技术·天线基础[M]. 西北工业大学出版社, 2008.
- [100] Yi Z, Xue S, Xie L, et al. Detection of Setting Time in Cement Hydration Using Patch Antenna Sensor[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2021(Under review).
- [101] Chung K L, Wang L, Ghannam M, et al. Prediction of concrete compressive strength based on early-age effective conductivity measurement[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021,35:101998.
- [102] Lingling W, Kwok C, Weihua Z, et al. A Highly Sensitive Microwave Patch Sensor for Multidirectional Strain Sensing Based on Near Orthogonal Modes[J]. *IEEE Access*.
- [103] Dhar, S., Ghatak, R., Gupta, B., & Poddar, D. R. (2013). A wideband Minkowski fractal dielectric resonator antenna. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 61(6), 2895-2903.
- [104] Balanis C A. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th Edition[M]. Wiley Press, 2016.
- [105] Taylor H F W. *Cement Chemistry*. 2nd Edition[M]. London: Thomas Telford Publishing, 1997.
- [106] X. Z, X. Z D, C. K O, et al. Dielectric and electrical properties of ordinary Portland cement and slag cement in the early hydration period[J]. *Journal of Materials Science*, 1996,31(5).
- [107] Z. J S. Estimating volume fraction of bound water in Portland cement concrete during hydration based on dielectric constant measurement[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2008, 60(3).
- [108] Yi, Z., Xue, S., Xie, L., Wan, G., & Wan, C. (2022). A slotted-patch antenna sensor with higher sensitivity for detecting setting time of cement paste. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-13.
- [109] Bansevicius, R., & Virbalis, J. A. (2006). Distribution of electric field in the round hole of plane capacitor. *Journal of electrostatics*, 64(3-4), 226-233.
- [110] Xue, S., Yi, Z., Xie, L., Wan, G., & Ding, T. (2019). A passive wireless crack sensor based on patch antenna with overlapping sub-patch. *Sensors*, 19(19), 4327.

- [111] Xue, S., Wang, H., Xie, L., Li, X., Zheng, Z., & Wan, G. (2024). Bolt loosening detection method based on double-layer slotted circular patch antenna. *Structural Health Monitoring*, 14759217241227992.
- [112] 薛松涛,易卓然,谢丽宇 & 万国春.(2021).无应力组合贴片天线传感器温度性能模拟测试.哈尔滨工程大学学报(10),1439-1445.

致谢

写完论文的此刻，我是无比开心的，完成硕士毕业论文大概是我从本科入学以来做过的最有成就感的一件事，它横跨了我整整三年的硕士生涯，在这最后一学期终于厚积薄发。虽然论文中的研究内容与成果是十分稚嫩且局限的，但毋庸置疑的是，从头至尾我都尽心尽力地做出了我最大的努力，这样毫无愧疚与不安的满足感，正是做事总是三分钟热度且虎头蛇尾的我渴慕已久的。

除此之外，三年的硕士时光让我变成了一个更好的人，所以需要在此致谢的，不仅仅是帮助我完成这篇硕士论文的所有人和事，这三年中遇到的所有。

首先，我的导师谢老师是我最想感谢的人。不管是做人还是做研究，谢老师在我心中一直都是无可替代的榜样，能够成为谢老师的硕士研究生对我来说是一件无比幸运的事情。对于我研究的方向和研究中的问题，谢老师总能以敏锐的直觉与洞察力，给出关键且具体的建议，在这样一次次雪中送炭的鞭策与鼓励之中，我能够得以继续前进，也能够不断地提升自己发现问题、学习思考以及解决问题的能力。另外，谢老师平易近人与坦荡从容的人格魅力与对每个学生无微不至的关照也都是一直令我仰慕和钦佩的。希望在以后的人生中，同样地，不管是做人还是做事，我都可以做得和谢老师一样好。

其次，我最想感谢的第二个人是我的师兄易卓然。易师兄只比我大一岁，但在学习生活中的各个方面，都是我见贤思齐的完美榜样。对于基础薄弱的我来说，师兄无数次对我手把手的教学与指导都是我完成研究不可或缺的，师哥在协助我完成研究中所付出的时间、耐心、责任心以及对细节百密无一疏地把控所耗费的心力还有在我失落崩溃时给予的鼓舞与情绪价值，都是我无法用言语和行动来做出具体的感谢与回报的。易师兄同谢老师一样，也是我想努力成为的优秀的人，作为同龄人，我祝愿易师兄在今后的人生中一帆风顺，也希望未来我自己能够有机会回报这份难得的恩情。

再次，我最想感谢的第三个人和第四个人是我的同门吴通海还有电信学院的万老师。通海和我的缘分启源于考研复试时交换面试时间的聊天，再到后来成为同一个课题组的同门、慢慢变成亲密无间的挚友，感谢命运让我们走到在这里。通海不仅在平常的学习生活中作为同门给予了很多的支持和帮助，还带领我培养了欣赏、演奏甚至创作音乐的爱好。毕业之后我们将天各一方，在此祝愿我们的情谊历久弥新、万古长青，也祝愿我们都能坚持对音乐还有生活的热情，成为现在的自己理想中的人。万老师作为课题组交叉合作的指导老师，在我的课题研究中同样给出了很多关键的建议，同时非常感谢万老师慷慨地为我们课题组提供了电信学院的实验室和一些重要的实验仪器，我的所有实验都是在万老师的实验室完成的。希望我们和万老师后续的合作研究会越来越好。

最后之前再次，我最想感谢我的父母和亲故，正是因为和他们紧密的联结与羁绊，我才能够一直开心健康地活着。我有太多的亲故，虽然我无法在此刻这有限的篇幅里写下大家的名字，但我想在致谢中深情地说：谢谢你们一直在我的身旁从未离开过，我永远爱你们，也永远无条件地支持你们。

最后，我想感谢其他所有的人，包括我的新老朋友们、同门、师弟师妹、

师哥师姐、研究室的薛老师和唐老师以及我的所有课程老师、研一时在团委遇到的伙伴们、研二在实习时遇到的领导和前辈以及同事们、一起踢球的朋友和对手、一起玩乐队的伙伴、所有遇见过的人……谢谢你们，山高水长，我们会再次见面的，希望那时大家都能更加优秀、更加幸福。

致谢至此，我想以我自己的既简单又困难的理想作为对此前所有致谢的承诺，承诺以实现这样的理想作为行动上对以上致谢的回报。

我没有看过《钢铁是怎样炼成的》，但我仍然希望将这句经典的名言奉为主臬，这是我的信条，也是我的理想——人最宝贵的东西是生命，生命对人来说只有一次。因此，人的一生应当这样度过：当一个人回首往事时，不因虚度年华而悔恨，也不因碌碌无为而羞愧；这样，在他临死的时候，能够说，我把整个生命和全部精力都献给了人生最宝贵的事业——为人类的解放而奋斗。

我希望我的一生这样度过：在我回首往事时，我不会因虚度年华而悔恨，也不会因碌碌无为而羞愧；在我临死时，我可以问心无愧地告诉所有人，我已经把整个生命和全部精力都献给了人生最宝贵的事业——为人类的解放而奋斗。

范永瑞琛
2024年5月

个人简历、在读期间发表的学术成果

个人简历:

范永琛, 男, 1998 年 4 月生。

2020 年 6 月毕业于同济大学 土木工程专业 获学士学位;

2021 年 9 月入同济大学攻读硕士研究生。

已发表论文:

- [1] 范永琛, 谢丽宇. 一种基于开槽方法的介电常数检测传感器的灵敏度与尺寸解耦研究[J]. 同济大学土木工程学院全日制专业学位硕士研究生论文集