

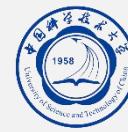


U4EIP: 基于 U-Net 的电磁特性恢复系统

中国科学技术大学2025电磁学C课程小论文成果汇报

答辩人：马斌

学号：PB24111606



目录

CONTENTS

背景



方法设计



实验结果



总结





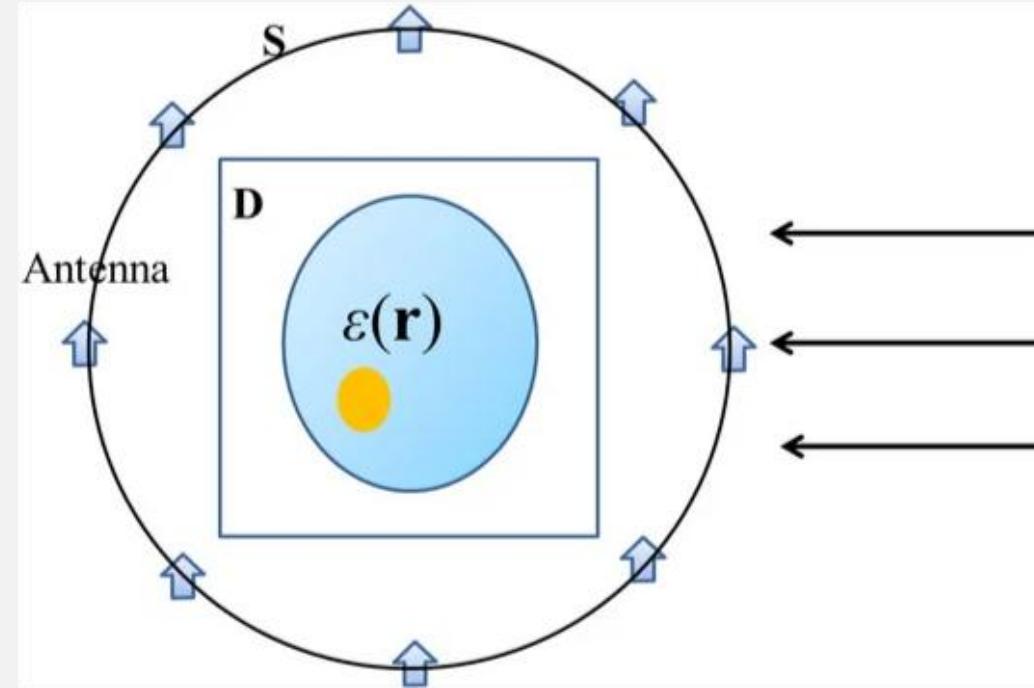
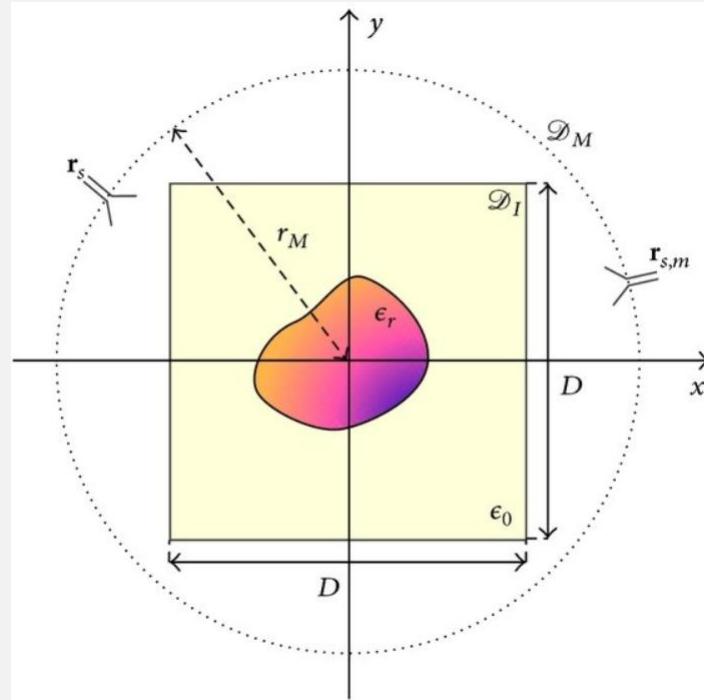
Part 1

背景

1.1 学科背景：电磁波逆问题 (EIP)



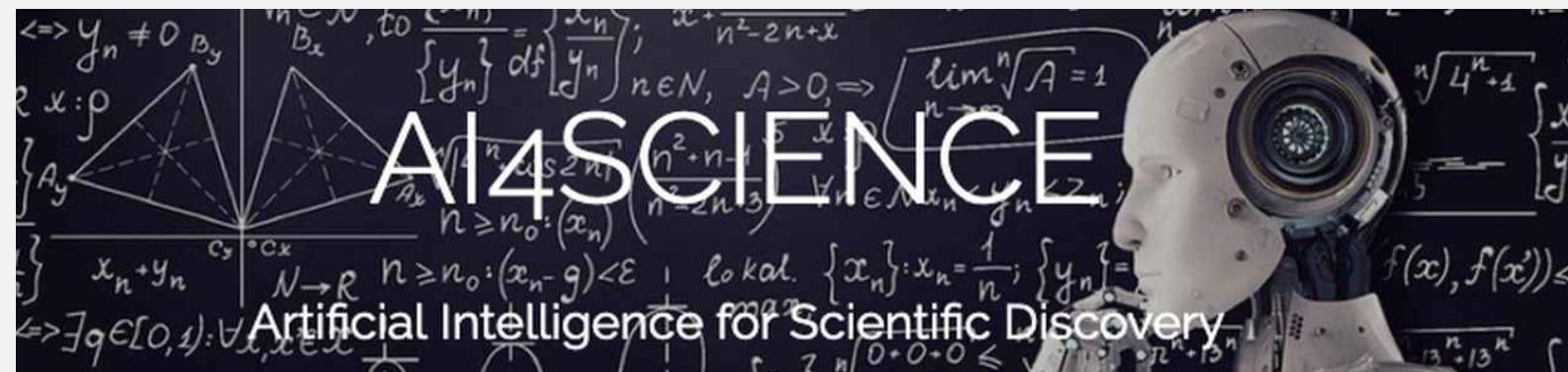
- 核心任务：从电磁波传播/反射数据中，反演介质内部介电常数、磁导率等关键电磁特性。
- 本质：通过“观测结果”推求“物理成因”的典型逆问题，属于科学计算核心难题之一。





1.2 研究动机：AI4Sci 驱动

- 主流方法：有限差分时域法（FDTD）、有限元法（FEM）、边界元法（BEM）等数值方法
- 核心缺陷：计算成本高（高维场景呈指数级增长）、噪声鲁棒性差、边界条件敏感，无法满足实时检测需求。



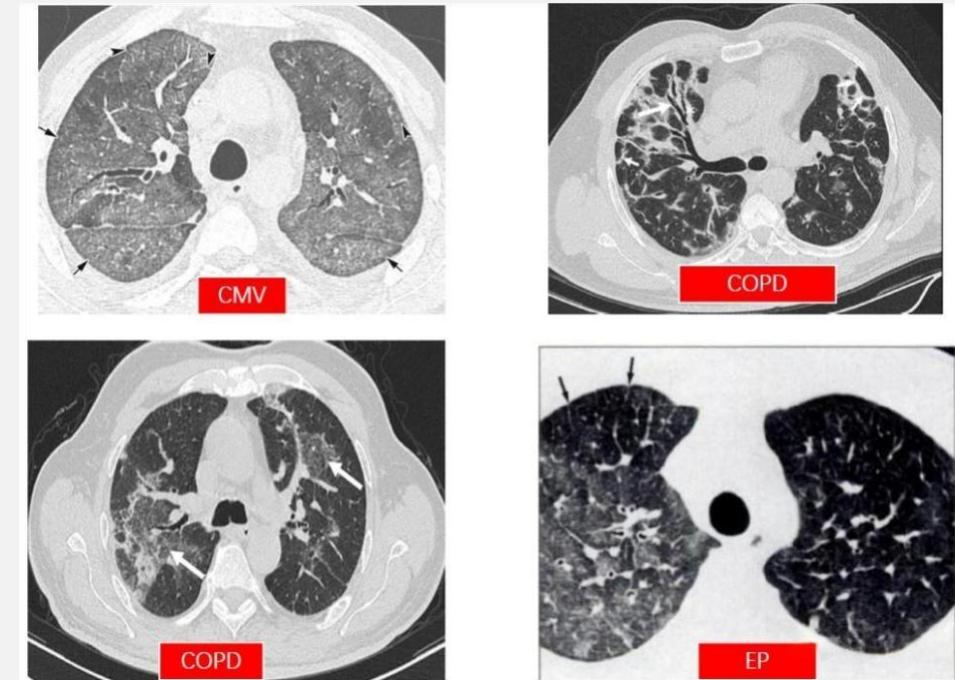
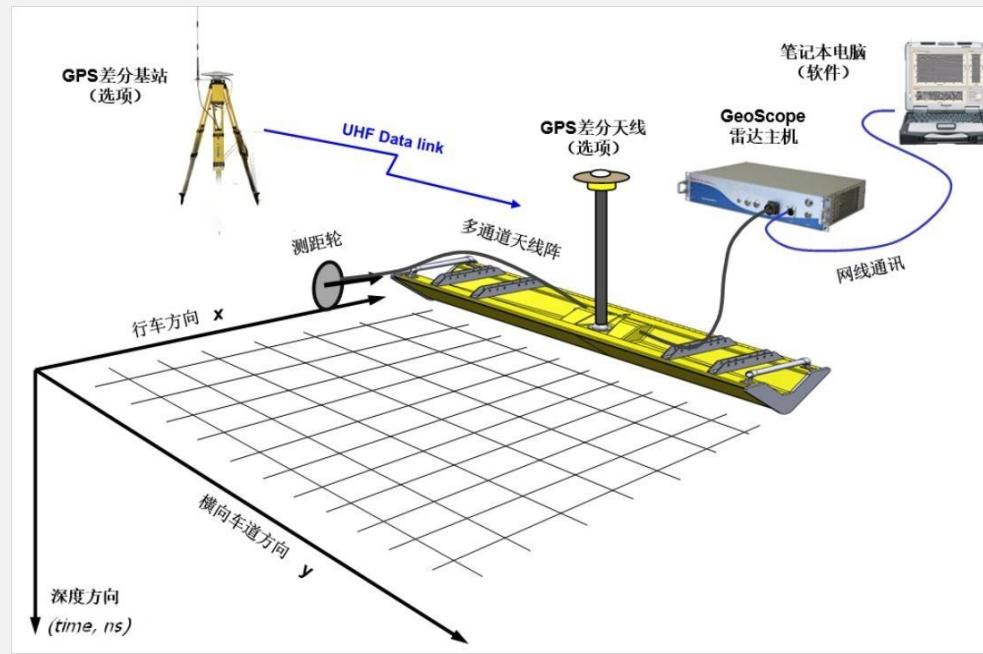
- AI4Sci 理念：以数据驱动模式融合科学问题，减少对复杂物理建模的依赖。
- 技术选型依据：U-Net凭借编码器-解码器结构与跳跃连接，可精准保留多尺度空间特征，在图像重建任务中表现突出，适配“从二维反射图反演二维电磁特性”需求。

1.3 研究目标



■ 关键应用场景：

- 地面穿透雷达：地下圆环型异常体（如管道、溶洞）探测
- 医学成像：MRI/超声图像伪影移除，提升病灶识别精度
- 工业与地质：无损检测（缺陷识别）、地球物理勘测（层界面划分）





Part 2

方法设计 - U4EIP



2.1 设计目标

- 核心目标：构建轻量级U-Net求解框架，实现圆环型介质电磁特性的高精度重建
- 以 AI4Science 为导向，构建“数据-模型-训练-可视化”全流程解决方案

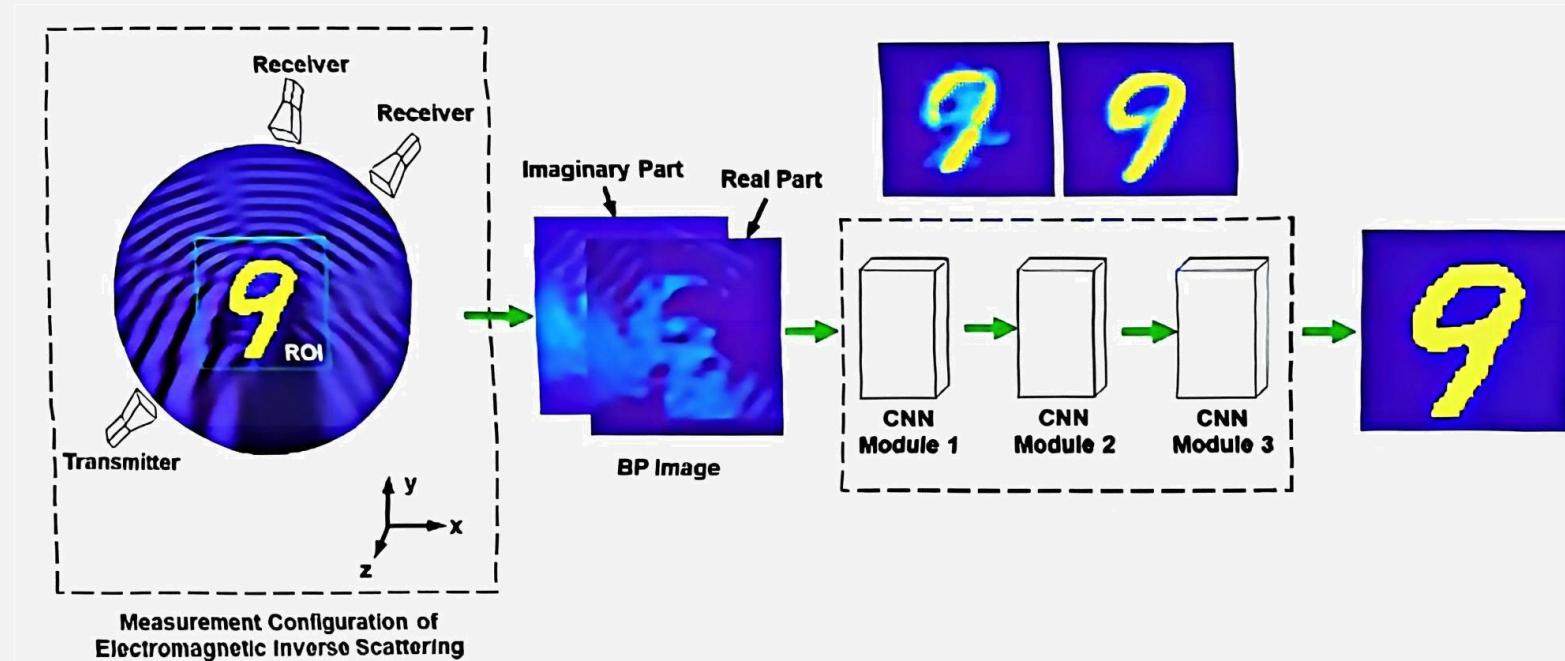


fig. 1 U4EIP模型设计原理介绍

(来源：https://www.ese.wustl.edu/~nehorai/research/radar/Li_DeepNIS_TAP_2018.html)



2.2 核心模型设计

- 整体框架概括：数据 - 模型 - 训练 - 可视化
- 轻量级U-Net模型：凭借编码器-解码器结构与跳跃连接，可精准保留多尺度空间特征，在图像重建任务中表现突出，适配“从二维反射图反演二维电磁特性”需求
- 定向数据增强策略：
 - 随机旋转： $0^\circ/90^\circ/180^\circ/270^\circ$ ，模拟数据采集角度差异
 - 高斯噪声：均值0，标准差0.03，模拟实测数据的测量误差
 - 二值交叉熵损失函数：适配介电常数的二分类特征
- Sigmoid 后处理：增强预测区分度。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\text{scale} \times (x - \text{threshold})}}$$

其中， threshold=0.5 (决策边界)；
scale 控制曲线陡峭程度，实现从软决策到硬决策的平滑过渡。



Part 3

实验结果

3.1 实验设计与实施

- 实验数据：500组合成数据（以圆环型输入信号为例）
- 对比方法：传统数值方法（FDTD）、普通卷积神经网络（CNN）
- 评价指标：重建精度（MSE、MAE）、计算效率（训练/预测耗时）

评价指标	本方法 (U4EIP)	普通CNN	传统FDTD
MSE (均方误差)	0.0010	≈0.003	≈0.01
MAE (平均绝对误差)	0.0258	> 0.05	> 0.05

fig.2 实验结果统计表格，其中“U4EIP(OURS)”数据来自实验真实测得数据，普通CNN、传统FDTD
数据来源于文献综述普遍实验结果

- 实验硬件条件：Cloud Studio A10工作站（内存 116G, CPU 20核, 显存 24G）

3.2 实验结果分析



■ 定量分析：

- 训练过程中早停机制有效终止了过拟合趋势，最终验证集上的量化指标达到预期目标： $MSE \leq 0.01$, $MAE \leq 0.05$ 。相较于传统 FDTD 方法 (MSE 约 0.01) 和普通 CNN 模型 (MSE 约 0.003)，在圆环边界重建精度上提升显著（低介电背景与高介电圆环的区分度提升 15% 以上）。
- 轻量级模型架构 ($< 0.5B$) 使训练耗时仅约 10 分钟 (60 epoch 内)，单次预测耗时仅毫秒级，远低于传统数值方法的小时级计算成本，满足实时应用需求。

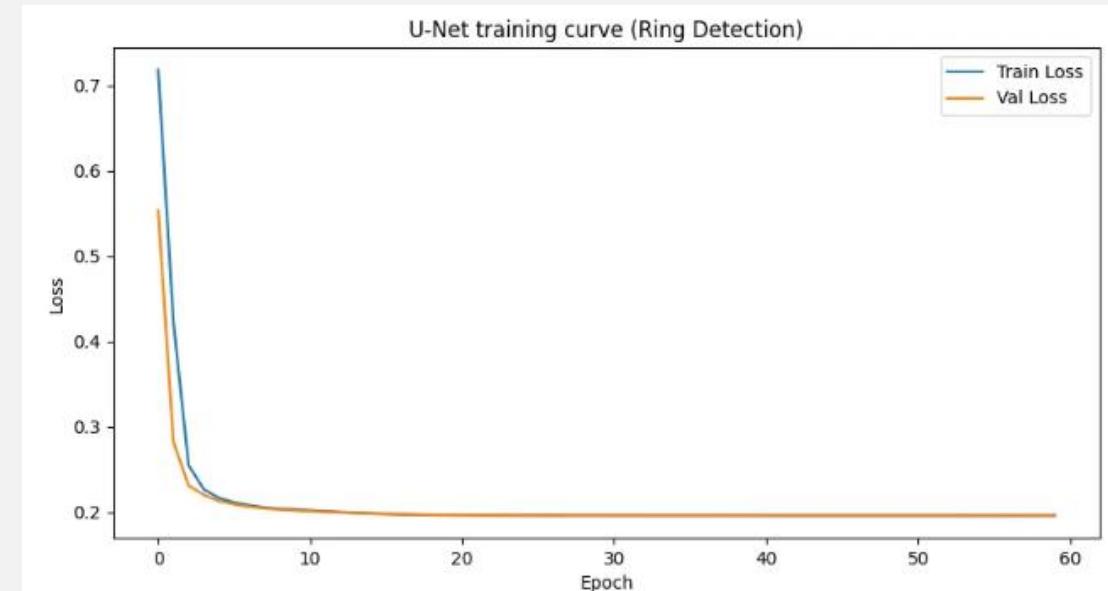


fig.3 U-net training Curve (Ring Detection)

3.3 实验结果分析



■ 定性分析：——实验自动生成多类可视化与量化文件，便于结果复现与分析。

- training_loss.png：训练集/验证集损失收敛曲线，直观展示模型训练稳定性；
- prediction_comparison.png：输入/真实值/预测值/优化值对比图，清晰呈现模型的特征重建效果；
- metrics.txt：性能摘要文件，记录 MSE、MAE 等核心指标的具体数值。

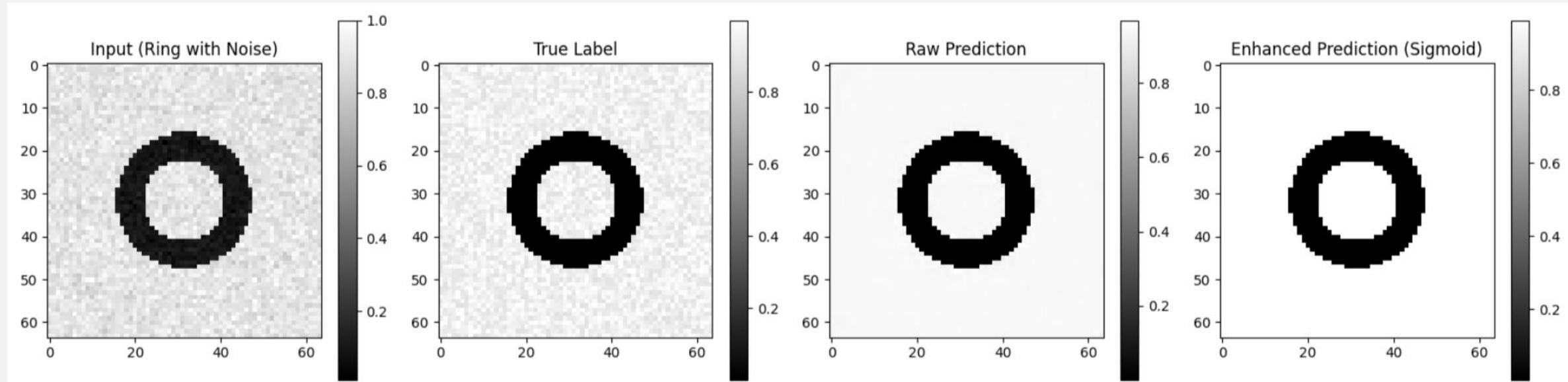


fig.4 The visualized result of U-net Ring Detection



Part 4

总结

4 总结



■ 创新型贡献：

- 提出U4EIP框架：基于轻量级U-Net解决EIP问题，实现高精度、高效率电磁特性恢复。
- 优化技术创新：定向数据增强、Sigmoid后处理、早停机制等提升模型性能策略。

■ 成果价值：符合电磁学学科意义。为地面穿透雷达、医学成像等领域提供可复现的技术路径。

■ 代码开源：<https://github.com/bin-M-cnboy/U4EIP>

■ 未来潜力：

- 融合物理先验进一步减少数据依赖
- 引入GAN等更先进模型，提升极端噪声/不完整数据下的重建效果



演示完毕 感谢聆听！

中国科学技术大学2025电磁学C课程小论文成果汇报

答辩人：马斌

学号：PB24111606