参赛学生姓名：	席齐远 黄会婧
中学：	北京师范大学附属实验中学
省份：	北京
国家/地区：	中国
指导老师姓名：	何道
指导老师单位：	北京师范大学附属实验中学
论文题目：	基于高增益螺旋天线+SDR 双模式微波遥感的土壤湿度测量

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

基于高增益螺旋天线+SDR 双模式微波遥感的土壤湿度测量

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

摘　要

在一次学校组织的郊游活动中我们看到田地里的农户用手抓起来一撮土捻了一下再撒回去，好奇地问他们这是干什么，农户回答说看看土是干还是湿。我们当时就在想土壤的湿度用手捻凭借经验判断不可能很准确吧，有没有什么方法能测量土壤里的湿度？于是回来开始了对这个问题的研究。经过查找了解到现在土壤湿度测量常用的手段有烘干法、插入式探针法以及卫星遥感等方法。

但这些手段都有局限性：烘干法准确但操作太复杂；插入式探针使用方便，但却只能代表探头周围几厘米的范围，并且精度受各种因素影响；卫星微波遥感覆盖广，却受限于公里级的空间分辨率与数天的重访周期。然而农业生产恰好需要的是一种使用方便并且能测量耕种地块大小平均含水量的方法。

经过长时间研究我们提出并实现了本文所述的一套双模式微波土壤湿度遥感系统，用同一套射频接收平台同时完成被动式 L 波段辐射测量与半主动式 GNSS-R 反射测量。前者接收地表自身的微波热辐射，后者把天上的 GPS 卫星当作免费的照射源，两者最终都通过土壤的相对介电常数与含水量相联系，却依赖完全独立的物理过程，因而共用平台具备开展双模式交叉验证的潜力，其一致性仍待配对观测检验。

围绕这一思路，本文完成了从天线到反演算法的全链路设计与制作。自制的轴向模圆极化螺旋天线以简单结构获得了较高的定向增益与较窄波束，为直达信号与地表反射信号的分离提供了硬件基础；阻抗匹配采用空气悬置、气隙可调的 Klopfenstein 连续渐变结构，把不可修正的加工误差转化为可现场调节的自由度，使天线到 LNA 的匹配损耗被压至极低水平；以 QPL9547 为核心的低噪声宽带 LNA 在设计带宽内提供约 18～19.5 dB 的稳定增益；双通道 SDR 完成直达与反射通道的同步 IQ 采样，并通过二维相关搜索从低于本底噪声的信号中捕获目标卫星，实现目标卫星 PRN 捕获与 C/N_0估计。

外场实验完成了两种模式的采集与模型反演，输出为给定参数下的含水量估计，绝对精度仍需独立真值验证。

本文由此验证了一条介于局部探针与大尺度卫星遥感之间的技术路径：在控制成本与系统复杂度的前提下，用一套可自制的射频平台实现对土壤含水状态的双模式观测。该平台通过更换天线与调整后端算法，还可进一步应用于精准灌溉、旱情预警乃至射电天文等微弱射频信号探测任务。

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026年度科学奖论文公示

关键词：土壤湿度；微波遥感；GNSS-R；L 波段微波辐射测量；圆极化螺旋天线；Klopfenstein 阻抗匹配；软件定义无线电

Abstract

During a school-organized field trip, we noticed a farmer pick up a handful of soil, rub it between his fingers, and then scatter it back onto the ground. Curious, we asked what he was doing. He replied that he was simply checking whether the soil was dry or wet. This led us to wonder: judging soil moisture by hand and experience could hardly be very accurate, so was there a more reliable way to measure the moisture content of soil? After returning from the trip, we began investigating this question. Our research showed that commonly used methods for soil moisture measurement include the oven-drying method, insertion-type probes, and satellite remote sensing.

However, each of these methods has its limitations. The oven-drying method is accurate but labor-intensive and complicated; insertion-type probes are convenient to use, but their measurements represent only the soil within a few centimeters of the sensor and can be affected by multiple environmental factors; satellite microwave remote sensing provides broad coverage but is limited by kilometer-scale spatial resolution and revisit periods of several days. Agricultural applications, however, require a method that is both convenient and capable of measuring the average soil moisture over an entire cultivated field.

After extensive research, we proposed and implemented the dual-mode microwave soil moisture remote-sensing system described in this paper. Using a single RF receiving platform, the system performs both passive L-band microwave radiometry and semi-active GNSS-R reflectometry. The former measures microwave thermal radiation emitted by the ground surface, while the latter uses GPS satellites as freely available illumination sources. Both measurements are ultimately related to soil moisture through the relative dielectric permittivity of the soil, yet they rely on independent physical processes, so the shared platform has the potential for cross-validation between the two modes; their consistency remains to be tested through paired observations.

Based on this concept, we completed a full-chain design and implementation from the antenna system to the retrieval algorithm. A self-designed axial-mode circularly polarized helical antenna achieves relatively high directional gain and a narrow beamwidth with a simple structure, providing the hardware basis for separating direct and surface-reflected

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026正成杯中学科学论文公示

signals. For impedance matching, an air-suspended, air-gap-adjustable Klopfenstein continuously tapered structure was developed, converting otherwise irreversible fabrication errors into a field-adjustable degree of freedom and reducing the matching loss between the antenna and the LNA to a very low level. A low-noise broadband amplifier based on the QPL9547 provides a stable gain of approximately 18–19.5 dB across the designed bandwidth. A dual-channel SDR performs synchronized I/Q sampling of the direct and reflected channels, while a two-dimensional correlation search enables PRN acquisition of target satellites whose signals lie below the noise floor, together with C/N_0 estimation.

In field experiments, data acquisition and model-based retrieval were completed in both modes over test plots with different moisture levels. The outputs are soil moisture estimates under the given parameters, and their absolute accuracy still requires validation against independent ground truth.

The results demonstrate a technical approach that bridges the gap between local probe measurements and large-scale satellite remote sensing. With controlled cost and system complexity, a self-built RF platform can provide dual-mode observations of soil moisture conditions. By replacing the antenna and adapting the back-end algorithms, the same platform may also be extended to applications such as precision irrigation, drought monitoring, and weak RF signal detection in radio astronomy.

Keywords: soil moisture; microwave remote sensing; GNSS-R; L-band microwave radiometry; circularly polarized helical antenna; Klopfenstein impedance matching; software-defined radio

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公文公示

目 录

第一章 引言 6
第二章 双模式测量原理与反演方法 8
2.1 定性物理链路 8
2.2 土壤介电特性与微波响应 9
2.3 空气与土壤界面的电磁响应 11
2.4 被动式模式的温度测量与反演 12
2.5 半主动式模式的相关功率与反演 14
2.5.1 双通道观测几何 14
2.5.2 由 IQ 数据获得净相关峰功率 14
2.5.3 从功率比到圆极化反射率 14
2.6 介电常数到含水量及结果解释 15
2.7 测量平台的实现依据 15
2.7.1 螺旋天线的尺寸与接收方向 15
2.7.2 阻抗过渡与前端损耗 16
2.7.3 接收机噪声与增益设置 17
2.7.4 数字功率统计与捕获指标 17
第三章 实验器材制备 18
3.1 系统制作部分 18
3.1.1 天线系统的结构设计与绕制 18
3.1.2 空气悬置渐变线阻抗匹配设计 21
3.1.3 低噪声放大（LNA）模块设计与噪声性能分析 27
3.1.4 软件无线电平台（SDR）的通道配置能力 30
3.1.5 微弱测试信号源 32
3.2 系统成本核算 32
第四章 被动式 L 波段辐射测量实验 34
4.1 测量原理与定标方法 34
4.2 实验配置 35
4.2.1 设备连接与 SDR 采集参数 35

2026 STEAM High School Science Award
仅用于2026江苏省中学科学奖论文公示

4.2.2 标定物理量测定 35
4.3 实验流程 35
4.4 接收链路运行验证 39
4.5 正式测量 40
4.6 本章小结 45
第五章 半主动式测量实验 47
5.1 测量关系与简化条件 47
5.2 实验配置 48
5.2.1 天线系统与 SDR 配置 48
5.2.2 直达信号与反射信号分离方案 49
5.3 实验流程 50
5.4 直达通道运行验证 51
5.4.1 全 PRN 并行搜索结果 53
5.4.2 单 PRN 连续接收稳定性 54
5.5 正式测量 56
5.5.1 初测问题与条件调整 56
5.5.2 数据采集 56
5.6 本章小结 58
第六章 结论与展望 60
参考文献 62
致 谢 64

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

第一章 引言

水，农业的第一要素，而何时浇、浇多少，取决于对土壤湿度的判断。本项目起于我们在江西丘陵农田中的观察：雨后，坡地排水很快，同一片地里高处土壤已经干燥开裂，低处仍然积水；农户往往只能凭土色、手感和经验判断是否灌溉。手持探针能读出脚边一小块土地的局部含水量，却难以代表整块田；卫星能够覆盖大范围，却常把多个村庄压缩在同一个像元中。由此产生了本研究最初的问题：能否寻找一种办法搭建一套成本足够低、又能在田块尺度连续观测土壤湿度的测量系统？我们先后研究了土壤样本烘干法、电导率测量、光谱测量、地表空气湿度测量及微波遥感等方式，最终选择了微波遥感技术来实现这一目标。

微波遥感的物理基础是：水的相对介电常数（约 80）远高于干土（约 3—5），土壤体积含水量的微小变化会引起土壤整体介电常数的显著改变，进而改变地表的微波辐射发射率与雷达散射、反射特性。其中，L 波段（1—2 GHz）因波长较长、对植被与大气的穿透能力强、受地表粗糙度影响相对较小，且对表层 0—5 cm 含水量最为敏感，被公认为土壤湿度遥感的最优频段。相比于电导率点测、近地空气含水量测量及烘干法等手段，微波测量有测量面积大，效率高，操作简单等优点。正因为这一特点，微波测量正被逐步用于土壤湿度测量的空间应用：欧洲空间局的 SMOS（2009 年发射）**Error! Unknown switch argument.**与美国国家航空航天局的 SMAP（2015 年发射）**Error! Unknown switch argument.**两大 L 波段卫星任务的成功，确立了 L 波段被动微波辐射测量在全球土壤湿度反演中的主导地位。

但卫星受天线尺寸限制，被动微波的典型分辨率约为数十公里，重访周期 2 至 3 天，难以支撑米级制图。这一矛盾推动了地基设备向下沉的努力。欧空局 ELBARA 系列作为卫星地面真值验证的参考级辐射计，精度可靠但体积庞大。Houtz 等人研制的便携式辐射计 PoLRa**Error! Unknown switch argument.****Error! Unknown switch argument.**证明 SMAP 星载算法体系可以直接迁移，简化射频架构同样可实现高精度测量；在土壤反演方面，Dobson 的四组分介电混合模型 **Error! Unknown switch argument.****Error! Unknown switch argument.**与 Mironov 的广义折射混合模型 **Error! Unknown switch argument.**给出了介电常数与含水量的关系，Wang-Choudhury 粗糙度修正与 τ-ω 植被辐射传输模型被纳入 L-MEB（L-band Microwave Emission of the Biosphere）模型[8]，用于描述亮温与土壤含水量的关系。**Error! Unknown switch argument.**

2026 Science Youth Publication 仅用于2026年成都市青少年科学论文公示

然而，被动式链路具有一定局限性：其测量对象为绝对功率，必须依赖冷热参考定标。而半主动式链路则可补充这一缺陷。GNSS-R 以导航卫星持续广播的 L 波段信号为照射源，属双基地雷达体制，其观测量是直达与反射两路的比值，链路方程中卫星发射功率与天线增益被同时消去，因而不需要绝对定标。Larson 等人于 2008 年开创单天线路线 **Error! Unknown switch argument.Error! Unknown switch argument.**，从信噪比时间序列中提取多路径干涉特征；Rodriguez-Alvarez 等人随后提出干涉模式技术并发展出 SMIGOL 地基接收机 **Error! Unknown switch argument.Error! Unknown switch argument.**。双天线路线则以上视右旋直达与下视左旋反射的功率比估计地表反射率[11]。星载层面，TDS-1 首次证明星载 GNSS-R 能够感知土壤湿度[13]，CYGNSS 星座则使延迟多普勒图成为标准观测量[14]。半主动式的限制同样明确：镜面反射点随卫星运动而移动，观测几何不可自由选择，单次捕获的稳定性也不如辐射计。Yin 等人在瓦伦西亚锚定站开展的 SOMOSTA 实验[15]，以一副上视天线配一副双极化下视天线测得反射率并反演含水量，结果与 ELBARA-II 辐射计彼此吻合良好，与原位实测及降雨记录的对应也很好。但该实验依赖两套独立的商业仪器，天线口径、波束宽度与足印大小均不相同，并未进行物理机理的整合。若能让两种模式共用同一副天线结构与同一条接收链路，观测几何与硬件响应即可对齐，物理机理层面的差异互补才可体现。

要在单一平台上承载两种模式，关键在天线与接收链路。本研究的双通道 GNSS-R 方案采用圆极化天线；为兼顾被动式测量、定向接收与自制便利性，选择轴向模螺旋天线；其高增益带来的窄波束，既把足印压缩到田块尺度，也为直达与反射信号的分离提供了条件。代价是螺旋天线的高输入阻抗与标准射频系统之间的严重失配，需要专门的渐变线匹配结构[16][16]，这也构成本研究的一项重要工程内容。

值得注意的是，射电天文最经典的观测目标、中性氢 21 cm 谱线的频率为 1420.4 MHz，恰好落在土壤湿度被动遥感所用的 L 波段受保护频段（1400 至 1427 MHz）之内。这意味着射电天文数十年来为探测极微弱宽带噪声信号发展出的整套接收与定标技术，在硬件层面与 L 波段土壤湿度辐射测量天然兼容。配合已具备双通道相干采样能力的软件无线电平台，这个意外的巧合使得两种模式得以在同一条链路上实现。

综合以上，我们发现已有研究有三处空白。其一，已有的双模式对比研究均建立在两套独立设备之上，机理差异与设备差异始终无法分离，尚无在共用天线与接收链路的单一平台上并行实现两种机理的工作。其二，高增益螺旋天线的渐变线匹配理论成熟，但面向实际加工误差的可调设计方案缺乏工程化讨论。其三，在不配置专用双

2026 Tianyu High School Science Award
仅用于2026年成都市天府中学科学奖公示

线极化辐射计的条件下，单通道圆极化等效亮温的反演边界如何界定，能否利用 GNSS-R 观测量约束粗糙度与植被等干扰参数，仍是开放问题。本研究针对这三点展开。

全文共六章。第二章介绍双模式测量原理与反演方法，第三章介绍器材制备，第四、第五章分别报告被动式与半主动式实验，第六章总结结论与展望。

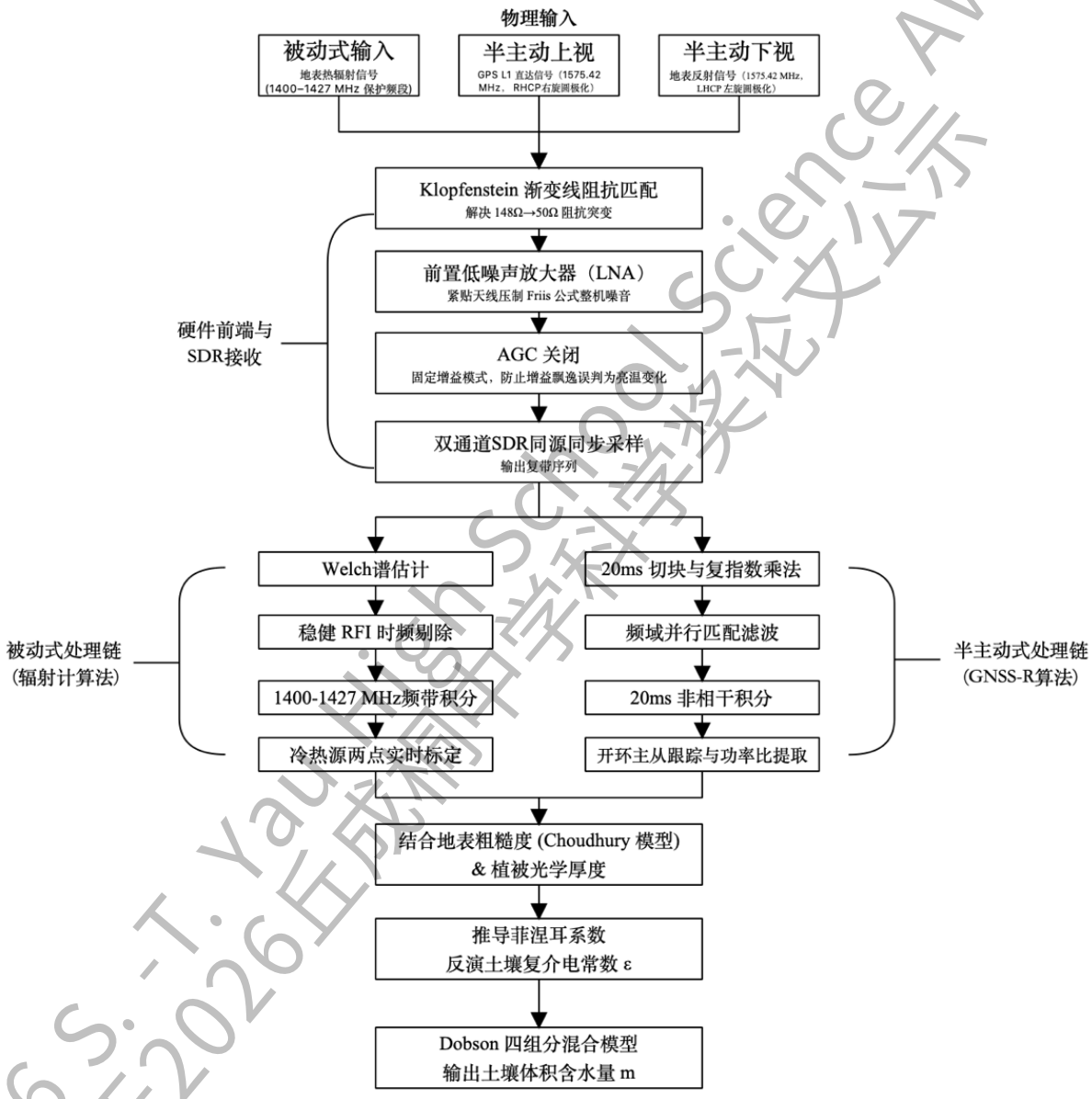


图 1.1 全文结构图

第二章 双模式测量原理与反演方法

两种模式均以土壤介电性质为中间量，但测量路径不同。本章先建立“含水量—介电常数—界面响应”的共同关系，再分别推导温度测量和功率比测量的反演路径，

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

最后说明实现这些测量所需的天线、接收链路与数字处理条件。

2.1 定性物理链路

微波遥感反演土壤湿度的物理基础在于液态水($\varepsilon \approx 80$)与干土($\varepsilon \approx 3-5$)介电特性的巨大差异。微波遥感无法直接获取土壤含水量m_v，其观测目标（被动式亮温T_B或半主动式反射率R）本质上是由地表介电常数ε决定的电磁响应，因此，我们构建如图 2.1 所示的定性物理链路。

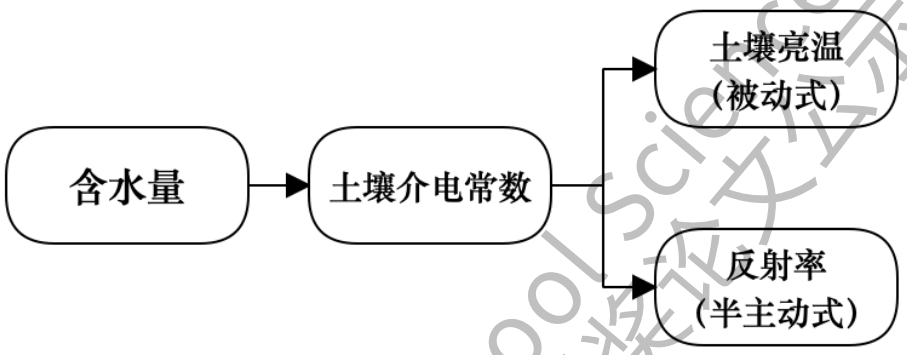


图 2.1 双模式物理链路示意图

2.2 土壤介电特性与微波响应

首先我们推导土壤含水量与土壤介电常数的定量关系。取一块总体积为 V 的土样，将其分为：

表 2.1 土样各组分的体积、体积分数与相对介电常数

组分	体积	体积分数	相对介电常数
土壤固体颗粒	V_s	$\phi_s = \frac{V_s}{V}$	ε_s
空气	V_a	$\phi_a = \frac{V_a}{V}$	$\varepsilon_a \approx 1$
自由水	V_{fw}	$\phi_{fw} = \frac{V_{fw}}{V}$	ε_{fw}
束缚水	V_{bw}	$\phi_{bw} = \frac{V_{bw}}{V}$	ε_{bw}

定义体积含水量：

$$m_v = \frac{V_{fw} + V_{bw}}{V} = \phi_{fw} + \phi_{bw} \tag{2.2.1}$$

四种组分满足：

$$\phi_s + \phi_a + \phi_{fw} + \phi_{bw} = 1 \tag{2.2.2}$$

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

代入式(2.2.1)，得到：

$$\phi_a = 1 - \phi_s - m_v \tag{2.2.3}$$

定义干土质量M_s，计算土壤干容重：

$$\rho_b = \frac{M_s}{V} \tag{2.2.4}$$

和土壤颗粒密度：

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \tag{2.2.5}$$

两者相除：

$$\frac{\rho_b}{\rho_s} = \frac{\frac{M_s}{V}}{\frac{M_s}{V_s}} = \frac{V_s}{V} = \phi_s \tag{2.2.6}$$

于是，空气体积分数可以写成：

$$\phi_a = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} - m_v \tag{2.2.7}$$

引入介电混合模型，并展开四个组分可以得到：

$$\varepsilon^\alpha \approx \phi_a \varepsilon_a^\alpha + \phi_s \varepsilon_s^\alpha + \phi_{fw} \varepsilon_{fw}^\alpha + \phi_{bw} \varepsilon_{bw}^\alpha \tag{2.2.8}$$

对于非磁性、损耗较小的介质而言

$$n = \sqrt{\varepsilon} \tag{2.2.9}$$

采用ε^α体积混合，Dobson 经验公式拟合得到$\alpha \approx 0.65$

因此，若采用折射率按体积分数混合的近似，便得到：

$$\varepsilon_m^{0.65} \approx \sum_i \phi_i \, \varepsilon_i^{0.65} \tag{2.2.10}$$

利用

$$\phi_s = \frac{\rho_b}{\rho_s}, \phi_a = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} - m_v, \varepsilon_a^\alpha \approx 1 \tag{2.2.11}$$

得到：

$$\varepsilon_m^\alpha \approx \frac{\rho_b}{\rho_s} \varepsilon_s^\alpha + \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} - m_v\right) + \phi_{fw} \varepsilon_{fw}^\alpha + \phi_{bw} \varepsilon_{bw}^\alpha \tag{2.2.12}$$

将固体相关两项合并：

$$\frac{\rho_b}{\rho_s} \varepsilon_s^\alpha - \frac{\rho_b}{\rho_s} = \frac{\rho_b}{\rho_s} (\varepsilon_s^\alpha - 1) \tag{2.2.13}$$

于是：

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

$$\varepsilon_m^{\alpha} = 1 + \left(\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)(\varepsilon_s^{\alpha} - 1) + \phi_{fw}\varepsilon_{fw}^{\alpha} + \phi_{bw}\varepsilon_{bw}^{\alpha} - m_v \quad (2.2.14)$$

因实际计算时难以计算自由水和束缚水的比例，采用 Dobson 经验近似：

$$\phi_{fw}\varepsilon_{fw}^{\alpha} + \phi_{bw}\varepsilon_{bw}^{\alpha} \approx m_v^{\beta}\varepsilon_{fw}^{\alpha} \quad (2.2.15)$$

其中，β 随土壤质地变化，用来表征两种水的综合介电响应,m_v为真实的水体积分数，m_v^{β}为模型中的经验权重，表示水的介电贡献。

将式(2.2.15)代入式(2.2.14)，等式两边取$\frac{1}{\alpha}$次幂，得到湿土介电常数：

$$\varepsilon_m = \left[1 + \left(\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)(\varepsilon_s^{\alpha} - 1) + m_v^{\beta}\varepsilon_{fw}^{\alpha} - m_v\right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2.2.16)$$

式中，$\left(\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)(\varepsilon_s^{\alpha} - 1)$代表固体颗粒相对于空气的介电贡献，其后两项依次代表自由水与束缚水的综合经验贡献，以及水占据孔隙后减少的空气贡献。湿土介电常数是接下来探究半主动式和被动式两种模式通用的物理基础。

2.3 空气与土壤界面的电磁响应

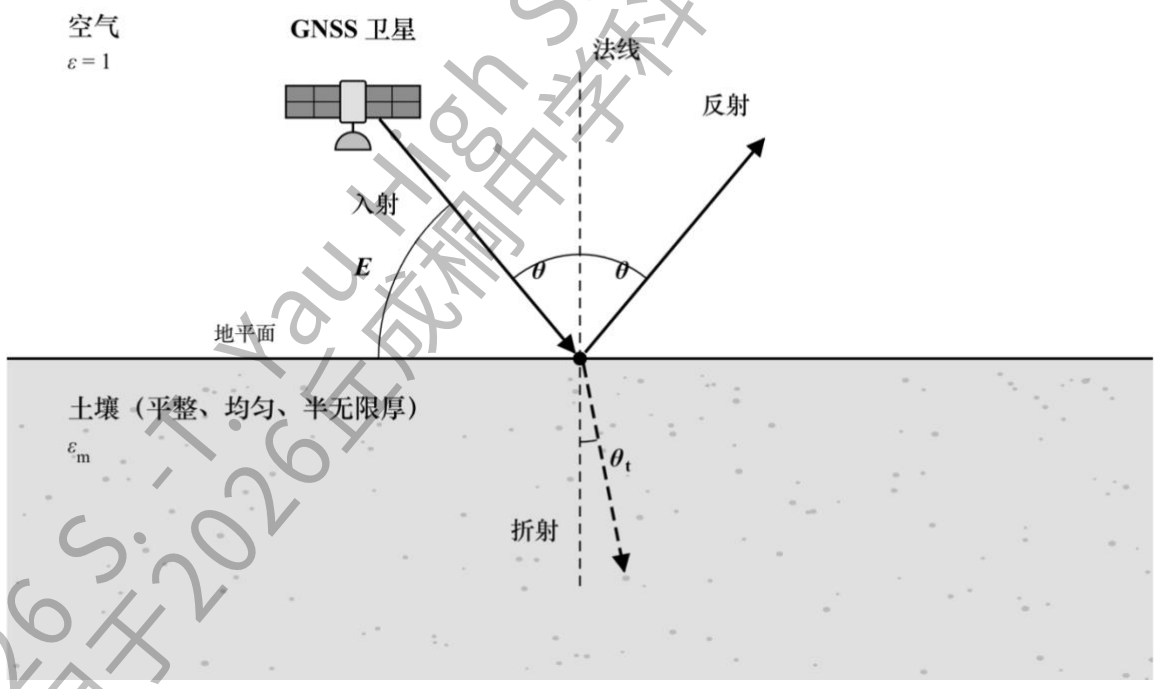


图 2.2 空气与土壤界面几何关系

先考虑平整、均匀、半无限厚的土壤介质。入射角θ从地表法线量起；在局部水平地面和镜面反射近似下，它与卫星仰角E满足：

$$\theta = 90^{\circ} - E \quad (2.3.1)$$

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

先在损耗较小的情形下令折射率：

$$n_2 = \sqrt{\varepsilon'} \tag{2.3.2}$$

由 Snell 定律有：

$$n_2 sin\theta_t = sin\theta \tag{2.3.3}$$

因而

$$n_2 cos\theta_t = \sqrt{\varepsilon' - sin^2\theta} \tag{2.3.4}$$

令入射电场幅度归一化为1，透射振幅为t_H。水平极化的切向电场、磁场连续条件分别给出：

$$1 + \rho_H = t_H \tag{2.3.5}$$

和

$$cos\theta(1 - \rho_H) = n_2 cos\theta_t t_H \tag{2.3.6}$$

代入前式消去t_H，再将含ρ_H的项移到同一侧，即得到式(2.3.7)。垂直极化在本文基矢约定下相应满足：

$$(1 - \rho_V)\cos\theta = t_V \cos\theta_t$$

和

$$1 + \rho_V = n_2 t_V$$

同样消去t_V得到式(2.3.8)。将介电常数推广为复数后，这两个 Fresnel 系数写为：

$$\rho_H = \frac{cos\theta - \sqrt{\varepsilon - sin^2\theta}}{cos\theta + \sqrt{\varepsilon - sin^2\theta}} \tag{2.3.7}$$

$$\rho_V = \frac{\varepsilon cos\theta - \sqrt{\varepsilon - sin^2\theta}}{\varepsilon cos\theta + \sqrt{\varepsilon - sin^2\theta}} \tag{2.3.8}$$

这里ε为土壤复相对介电常数。相应功率反射率为$R_H = |\rho_H|^2$和$R_V = |\rho_V|^2$。

对于自然热辐射，若圆极化 Stokes 分量可忽略，则圆极化接收通道对应的亮温为水平和垂直极化亮温的平均。在光滑界面条件下，其等效功率反射率为：

$$R_{CP}=\frac{R_H+R_V}{2}, \quad e_{CP}=1-R_{CP} \tag{2.3.9}$$

半主动式模式接收的是具有确定入射极化的 GPS 信号，需要先组合电场振幅，再取模平方。采用式(2.3.7)和式(2.3.8)的基矢约定，右旋入射信号的异旋与同旋反射功率分别为：

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

$$R_{LR}=\frac{1}{4}|\rho_V-\rho_H|^2,\quad R_{RR}=\frac{1}{4}|\rho_V+\rho_H|^2 \tag{2.3.10}$$

下标的第一个字母表示接收极化，第二个字母表示入射极化。右旋上视、左旋下视的理想配置应采用R_{LR}；若下视通道接收右旋分量，应采用R_{RR}。

2.4 被动式模式的温度测量与反演

亮温是把观测辐射强度换算为同频率黑体温度后的表征量，与土壤的物理温度T_s应加以区分。对不透射的裸土表面，在局部热平衡、短距离大气影响可忽略的近似下，土壤自身发射与反射的天空下行辐射共同给出：

$$T_B=e_{CP}T_s+(1-e_{CP})T_{\downarrow} \tag{2.4.1}$$

其中$T_{\downarrow}$表示到达地表的天空下行辐射等效温度。本实验优先选择植被稀疏地表，在裸土近似下处理，因此简化模型适用。

天线接收到的是其方向图加权后的天线温度T_A。在主波束主要覆盖目标、旁瓣与损耗影响较小时，可近似取$T_A\approx T_B$。在固定接收增益、带宽和处理方法下，数字功率读数与天线温度写成线性关系：

$$P=aT_A+b \tag{2.4.2}$$

这里a为温度到数字功率的比例系数，b为截距。

保持一致的接收设置、功率归一化和频率掩膜，分别观测有效温度已知的热参考T_h和冷参考T_c，得到$P_h=aT_h+b$及$P_c=aT_c+b$。两式相减消去截距，再代回，得到：

$$a=\frac{P_h-P_c}{T_h-T_c},\quad b=P_c-aT_c \tag{2.4.3}$$

因此，土壤观测的功率读数P_s对应：

$$T_A=T_c+\frac{P_s-P_c}{P_h-P_c}(T_h-T_c) \tag{2.4.4}$$

之后，由 Y 因子估计接收机等效输入噪声温度T_{rec}，使$P=a(T_A+T_{\mathrm{rec}})$。于是：

$$Y=\frac{P_h}{P_c}=\frac{T_h+T_{rec}}{T_c+T_{rec}} \tag{2.4.5}$$

两式相除，得到未知噪声温度：

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

$$T_{rec}=\frac{T_h\text{-}YT_c}{Y\text{-}1} \tag{2.4.6}$$

先由定标得到T_A，再在已说明的波束近似下得到T_B。对于裸土，将式(2.4.1)整理为：

$$e_{eff}=\frac{T_B-T_{\downarrow}}{T_s-T_{\downarrow}},\quad R_{eff}=1-e_{eff} \tag{2.4.7}$$

采用光滑裸土近似，令$R_{\mathrm{CP}}=R_{\mathrm{eff}}$。在已知入射角下，将它代入式(2.3.7)至式(2.3.9)，以数值求根方式确定ε'。

2.5 半主动式模式的相关功率与反演

2.5.1 双通道观测几何

上视通道用于接收 GPS 直达信号，下视通道朝向地面的镜面反射区。设天线离局部水平地面的高度为H，卫星仰角为E，当卫星距离远大于天线高度时，反射路径相对直达路径的超程近似为$2H\sin E$，因此：

$$\Delta\tau\approx\frac{2HsinE}{c},\quad \theta=90^{\circ}-E \tag{2.5.1}$$

GPS L1 C/A 码的码率为 1.023 Mcps，单个码片约为 978 ns；在 4.096 MS/s 复采样率下，采样间隔约为 244 ns。

2.5.2 由 IQ 数据获得净相关峰功率

设某一数据块的复采样为$x[n]=I[n]+jQ[n]$，本地生成目标 PRN 的 C/A 码$c[n]$。对候选码相位ℓ和多普勒频移f_D，相关量定义为[8]：

$$Z(\ell,f_D)=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}x[n]c^{*}[(n-\ell)modN]exp\left(-j2\pi f_D\frac{n}{f_s}\right) \tag{2.5.2}$$

指数项逐采样补偿候选频移；码移位项检验接收码与本地码是否对齐。搜索$|Z|^2$的最大值便得到候选码相位与多普勒。对于多个短数据块，可采用非相干积累。

$$S(\ell,f_D)=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}|Z_m(\ell,f_D)|^2 \tag{2.5.3}$$

1 ms 的 GPS C/A 码周期在本实验采样率下对应 4096 个复采样点。主通道先捕获

2026 S. -T. Yau High School Science Award
仅用于2026正式提申学科学奖论文公示

目标 PRN；下视通道在相应码相位与频移附近处理，并分别由相关峰减去峰外估计的噪声背景，得到净相关峰功率P_d和P_r。两路使用相同归一化与积累方式。

2.5.3 从功率比到圆极化反射率

考虑相干镜面反射占主导、直达泄漏可忽略的简化情况。将卫星发射功率与发射天线增益的乘积记为P_tG_t；直达距离为R_d，反射路径的入射段和返回段为R_i、R_s。用K_d、K_r分别表示接收天线在对应方向上的增益、馈线和电子链路增益等因素，得到：

$$\begin{aligned} P_d &= K_d P_t G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi R_d}\right)^2, \\ P_r &= K_r P_t G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi (R_i + R_s)}\right)^2 R_{pR} A_r \gamma^2. \end{aligned} \tag{2.5.4}$$

其中$p = L$或R，由实际下视接收极化决定；A_r为相干反射的粗糙度衰减因子，γ^2表示穿过植被的双程功率衰减。两式相除消去共同的P_tG_t，记$K = \frac{K_r}{K_d}$，可得：

$$q \equiv \frac{P_r}{P_d} = K \left(\frac{R_d}{R_i + R_s}\right)^2 R_{pR} A_r \gamma^2 \tag{2.5.5}$$

地面近距离试验中，R_d与$R_i + R_s$的比值非常接近 1，因此在给定或标定K及环境修正后，反演式为：

$$\widehat{R}_{pR} \approx \frac{q}{K A_r \gamma^2}, \quad q_{dB} = 10 log_{10} q \tag{2.5.6}$$

在高斯随机高度、相干镜面分量的模型下，取：

$$A_r = exp[-(2k\sigma_h cos\theta)^2] \tag{2.5.7}$$

其中$k = \frac{2\pi}{\lambda}$，σ_h为地表高度的均方根值。该相干衰减因子与被动式辐射模型的有效反射率参数化含义不同。

最后，以实际接收分量对应的式（2.3.10）求解$R_{pR}(\varepsilon', \theta) = \hat{R}_{pR}$，得到介电实部估计。

2.6 介电常数到含水量及结果解释

两种模式在获得ε'后，均可连接至同一含水量转换步骤。本文用 Topp 经验多项式给出简化估计[1]：

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

$$m_v = -5.3\times10^{-2} + 2.92\times10^{-2}\varepsilon' - 5.5\times10^{-4}(\varepsilon')^2 + 4.3\times10^{-6}(\varepsilon')^3 \qquad (2.6.1)$$

至此，两条反演链条分别为：被动式由冷热和目标功率得到天线温度，再由地表亮温、发射率与 Fresnel 关系求介电常数；半主动式由直达与反射净相关峰功率得到功率比，再经链路、极化和地表修正求介电常数。两者最后才由上式换算为含水量。

2.7 测量平台的实现依据

2.7.1 螺旋天线的尺寸与接收方向

轴向模螺旋天线以沿螺旋轴方向形成主波束和圆极化响应为主要特征[9]。令螺旋中心线直径为D，周长为$C=\pi D$，匝间距为S，匝数为N_h，则轴向长度与螺旋升角分别为$L=N_hS$和$\psi=\arctan\left(\frac{S}{C}\right)$。设计先由工作频率确定波长$\lambda=\frac{c}{f}$，再以$C$约为一个波长、$S$约为四分之一个波长作为轴向模的初始尺寸。

本实验以 GPS L1 频率 1575.42 MHz 作为尺寸设计参考，对应$\lambda\approx190.3$ mm。由 60 mm 支撑管和 4 mm 导体外径得到约 64 mm 的螺旋中心线直径，故$C\approx201$ mm。采用约 44 mm 匝间距和 15 匝时，$\frac{C}{\lambda}\approx1.06$、$\frac{S}{\lambda}\approx0.23$，轴向长度约 660 mm，升角约$12.3°$。

天线有效接收面积与对应方向增益的关系为：

$$A_e=\frac{G\lambda^2}{4\pi} \qquad (2.7.1)$$

对来自特定方向的卫星信号，提高该方向的增益可增加接收功率。

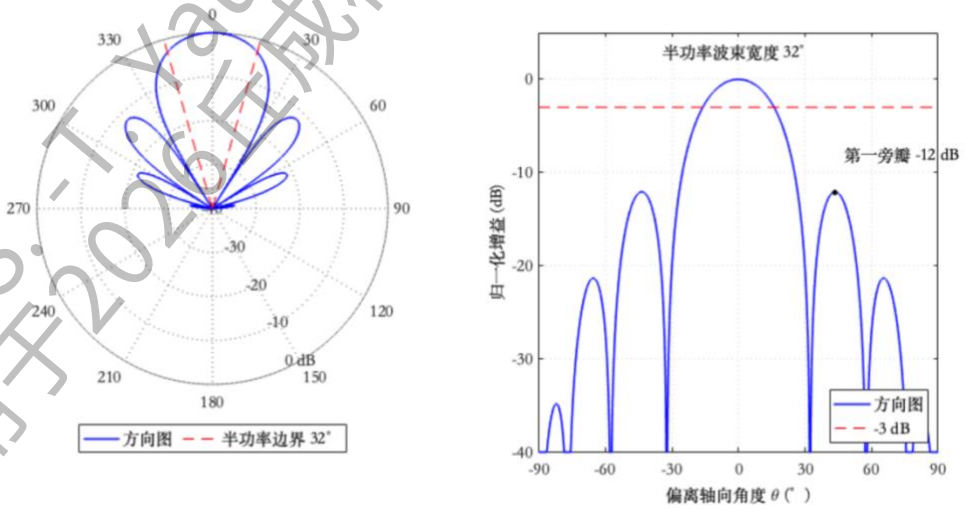


图 2.3 螺旋天线结构与方向计算结果

2.7.2 阻抗过渡与前端损耗

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026年成都电子科技学校论文公示

螺旋天线的输入阻抗与 50 Ω 接收接口之间需要过渡。在电抗较小的设计估算中，可用$R_A \approx \frac{140C}{\lambda}$得到约 148 Ω 的输入电阻。若直接接入 50 Ω 系统，端口振幅反射系数及失配损耗为

$$\Gamma_A = \frac{Z_A - 50}{Z_A + 50}, \quad L_{mis} = -10log_{10}(1 - |\Gamma_A|^2) \tag{2.7.2}$$

以纯电阻 148 Ω 估算，$|\Gamma_A| \approx 0.495$，失配损耗约 1.22 dB。

采用 Klopfenstein 渐变结构，使特性阻抗沿传输方向变化。小反射近似下，连续过渡段的输入反射可看作各微小阻抗变化所产生反射的相位叠加：

$$\Gamma_{in}(f) \approx \frac{1}{2}\int_0^l \frac{dlnZ(z)}{dz} exp\left[-2j\beta_g(f)z\right] dz \tag{2.7.3}$$

式中l为过渡段长度，β_g为导波相位常数。Klopfenstein 设计在给定端点阻抗与通带反射约束下选择阻抗变化规律，以控制有限长度内的反射[16]。

2.7.3 接收机噪声与增益设置

对多级接收链路，将各级附加噪声折算至输入端，可得 Friis 噪声温度关系[11]：

$$T_{rec} = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \cdots \tag{2.7.4}$$

其中G_i为线性功率增益。式(2.7.4)说明，将低噪声放大器靠近天线可减小后续级噪声的输入等效贡献；放大器之前的耗散损耗仍会降低有效信号并引入热噪声。

进行功率或温度定量测量时，本系统采用手动固定增益，并在校准和目标采集中保持一致。对于理想稳定的总功率辐射计，随机噪声对应的温度分辨能力近似随有效带宽B_{eff}和积分时间t变化：

$$\sigma_T \approx \frac{T_A + T_{rec}}{\sqrt{B_{eff}t}} \tag{2.7.5}$$

该关系说明平均可降低随机起伏；但定标误差、增益漂移、旁瓣污染和模型偏差等系统性影响不能仅靠简单平均消除。

2.7.4 数字功率统计与捕获指标

被动式模式的输入是噪声样信号，可采用分段加窗的平均周期图估计功率谱[12]。设每段长度为N，窗函数为$w[n]$，共平均K_b段，则双边谱的一个一致归一化写法为：

2026 S. - Tsinghua High School Science Award
仅用于2026年度清华大学科学奖论文公示

$$\widehat{S}_x[k]=\frac{1}{K_b f_s \sum_{n=0}^{N-1} w^2[n]} \sum_{b=1}^{K_b} \left| \sum_{n=0}^{N-1} w[n] x_b[n] e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \right|^2 \quad (2.7.6)$$

对保留频点求和并乘以频率间隔$\Delta f = \frac{f_s}{N}$，得到用于定标的带内数字功率。

半主动式模式采用 2.5.2 节的码相关处理。载噪密度比$\frac{C}{N_0}$中，C为信号功率，N_0为噪声功率谱密度；其线性量单位为 Hz，对数表示为 dB-Hz。本文界面中的 35 dB-Hz 是程序设置的捕获门限，连续区间内的捕获记录用于检验该条件下的持续接收和处理能力。

第三章 实验器材制备

3.1 系统制作部分

本节按信号流向，对测量系统的硬件加工与实物装配进行详细说明。硬件体系涵盖天线辐射单元、Klopfenstein 渐变线阻抗匹配网络、低噪声放大电路及 SDR 采集平台。被动式与半主动式测量方案共用该射频前端及 AD9361 数据传输接口，保证了多模式测量下硬件响应的统一性。

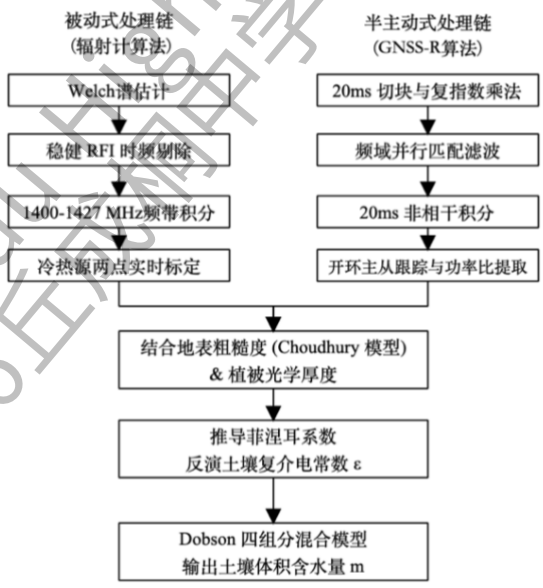


图 3.1 双链路系统结构

3.1.1 天线系统的结构设计与绕制

线极化和圆极化天线均可用于被动式测量，而本双通道 GNSS-R 方案采用圆极化天线，因此实验天线均设计为圆极化螺旋天线。我们采用 1575.42 MHz 为中心频率以

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

匹配 GPS L1 载波频率。系统的两副天线均为轴向模螺旋天线，绕向相反，分别为右旋（RHCP）与左旋（LHCP）。器材本身可按需求配置为上视或下视；在第五章的半主动式实验中，右旋天线上视接收 GPS 直达信号，左旋天线下视接收地表反射信号。

首先我们由轴模辐射条件确定螺旋天线的周长与直径。Kraus 给出的轴模辐射条件为螺旋周长 C 与波长之比落在$0.75 < C/\lambda < 1.33$区间内才能产生轴向圆极化辐射，且实验表明C/λ取在 1.0～1.15 附近时增益最高、轴比最优。本设计目标取$C/\lambda \approx 1.05$～1.1。由此反解所需直径：

$$D = C/\pi = (C/\lambda)\cdot\lambda/\pi$$

取$C/\lambda \approx 1.06$，$C \approx 1.06 \times 190.3mm \approx 201.6mm$，$D \approx 201.6/\pi \approx 64.2mm$。

因此，我们选用外径 60 mm 的白色 PVC 管作为骨架，其上以直径 4 mm 的铝管沿螺旋线绕制形成辐射体，实现电气有效直径：

$$D_{电气} = D_{骨架} + d_{铝管} = 60mm + 4mm = 64mm$$

对应周长与波长之比$C/\lambda \approx 1.06$，满足轴向模最佳辐射区间。

圆极化纯度（轴比）对螺距角α 较为敏感，Kraus 的经验结论是α 取*12°*～*14°*时轴比最好、增益也接近最优。由匝间距 S 与螺距角的关系：

$$S = C\cdot\tan\alpha$$

工程上取$S = 44mm$，反算螺距角以验证是否落在最佳区间：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{S}{C}\right) = \arctan\left(\frac{44}{201.1}\right) = \arctan(0.219) \approx 12.3°$$

落在*12°*～*14°*最佳区间内，说明 44mm 这一间距满足圆极化性能要求。

匝数 n 主要影响增益与波束宽度：匝数每增加一倍，增益大致提升约 3dB，但轴向长度随之线性增加，不利于下视天线的重量与安装稳定性。本设计取$n = 15$匝，是半主动测量所需方向性指标与结构可实现性之间的折中结果。对应轴向总长：

$$L = n\cdot S = 15 \times 44mm = 660mm \approx 660mm$$

此外，我们通过黑色胶布固定管壁外侧绕制天线，以保证匝间距均匀、螺旋轮廓规整。按 Kraus 经验公式估算，D=64 mm、S=44 mm、n=15 这组参数对应约 18 dBi 的增益与约 26°的半功率波束宽度（均为经验估算值，尚未经方向图实测），可满足半主动测量对下视天线“窄波束、高指向性”的要求。

由解析式可以得到输入的阻抗为：

$$Z_A \approx 140\frac{201}{190.3} \approx 148\Omega$$

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026正式提交科学论文公示

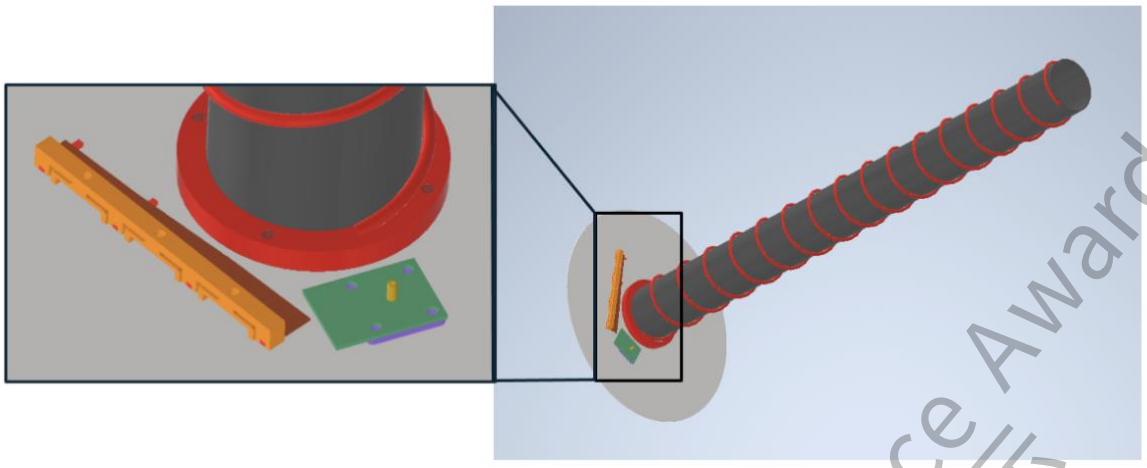


图 3.2 螺旋天线 CAD 设计仿真图



图 3.3 螺旋天线的加工制作

为改善前后比、减小背向及旁瓣接收，我们在天线底部加设直径大于 0.75λ（实际为 250 mm）的金属圆形反射板。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示



图 3.4 螺旋天线实图

3.1.2 空气悬置渐变线阻抗匹配设计

螺旋天线高输入阻抗（~148 Ω）与标准 50 Ω 射频系统直接连接会导致严重的阻抗失配。为将约 140—148 Ω 的天线端口过渡至 50 Ω 接收接口，我们设计连续渐变传输线（Klopfenstein Taper），使特征阻抗沿传播方向平滑过渡。实际设计时利用公式计算出传输线的形状曲线，将其分为每 3mm 一段，用直线进行拟合。我们设计了采用空气介质和聚四氟乙烯（PTFE）介质的两个版本，考虑到射频电路微调的方便性以及尺寸的敏感性，最终实际加工、装配和实验我们采用了空气悬置方案。以下是计算得到的空气介质和 PTFE 介质的分段宽度表格：

表 3.1 空气介质和 PTFE 介质的分段宽度表格

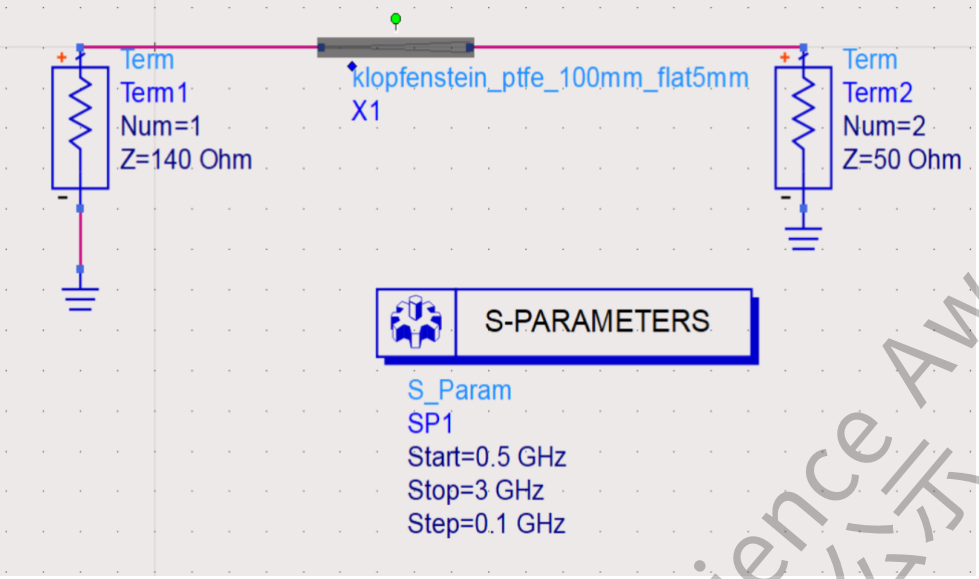
Position_mm	Impedance_Ohm	2mm Air (mm)	2mm PTFE (mm)
0	140	1.644	0.843
3	140	1.644	0.843
6	138.41	1.688	0.87
9	133.74	1.826	0.955
12	129.23	1.971	1.046
15	124.87	2.124	1.142
18	120.65	2.284	1.244
21	116.58	2.453	1.352

2026 S. -T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

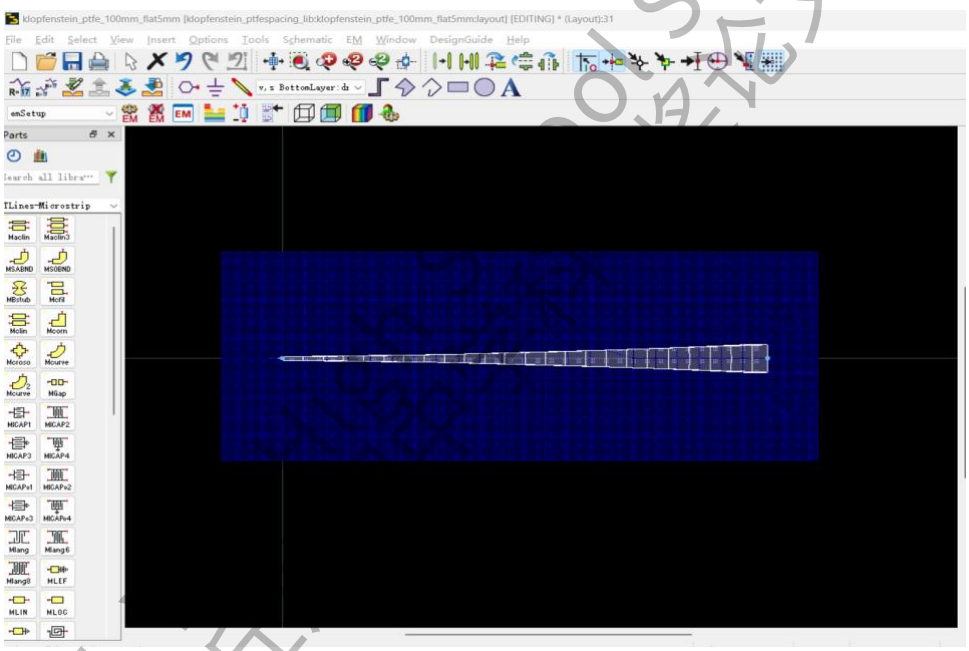
Position_mm	Impedance_Ohm	2mm Air (mm)	2mm PTFE (mm)
24	112.65	2.63	1.467
27	108.85	2.816	1.587
30	105.18	3.012	1.714
33	101.63	3.217	1.847
36	98.2	3.432	1.988
39	94.89	3.657	2.134
42	91.68	3.894	2.288
45	88.59	4.097	2.449
48	85.6	4.347	2.618
51	82.71	4.608	2.794
54	79.92	4.879	2.978
57	77.23	5.162	3.17
60	74.62	5.456	3.37
63	72.1	5.762	3.579
66	69.67	6.08	3.798
69	67.32	6.412	4.026
72	65.05	6.756	4.244
75	62.85	7.115	4.489
78	60.73	7.487	4.745
81	58.69	7.875	5.01
84	56.71	8.277	5.286
87	54.79	8.696	5.573
90	52.94	9.13	5.87
93	51.16	9.582	6.18
96	50	9.892	6.393
99	50	9.892	6.393

之后我们用 AutoCAD 软件绘制并导出 DXF 格式文件，导入 ADS/Momentum 进行全波电磁仿真，端口设定为 140 Ω→50 Ω，并优化 S 参数与 Smith 圆图收敛性。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示



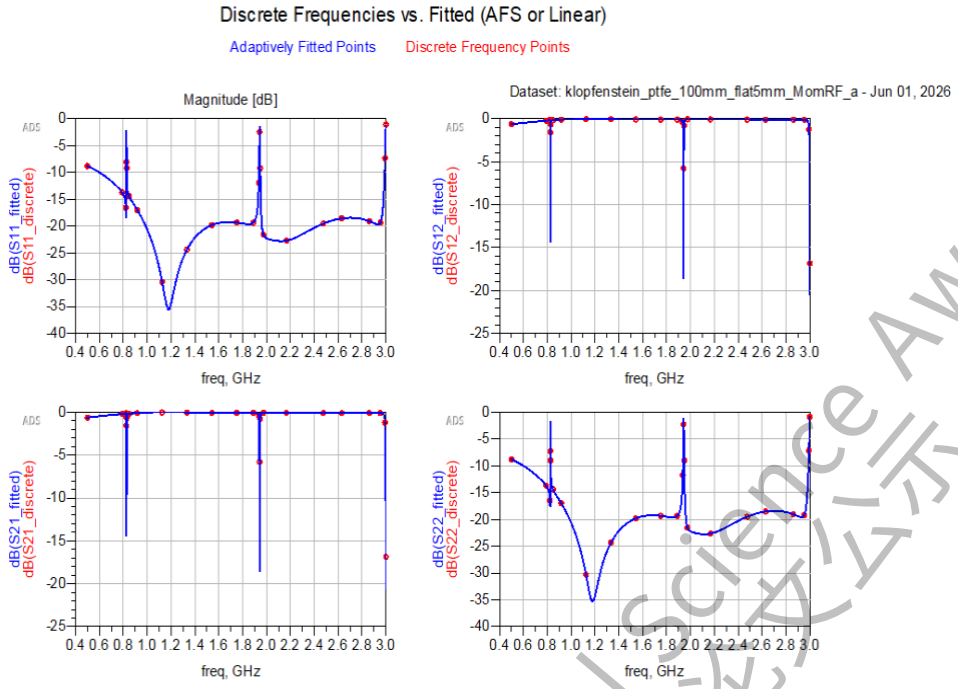
(a) S 参数仿真端口定义



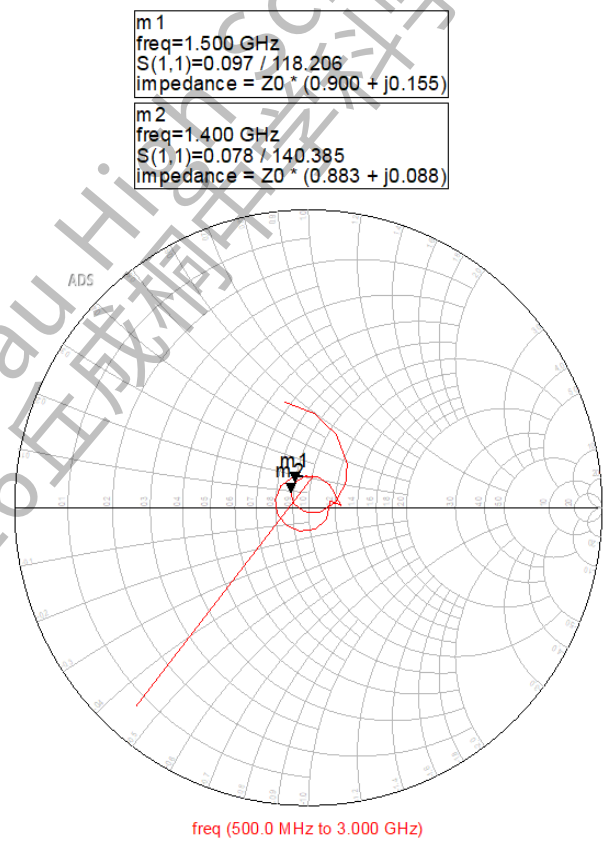
（b）导入 dxf 文件的阻抗匹配渐变线模型

图 3.5 Klopfenstein 渐变线 ADS/Momentum 仿真设置

2026 S. T. Award 仅用于2026届学生科技论文公示



(a) S 参数扫频结果

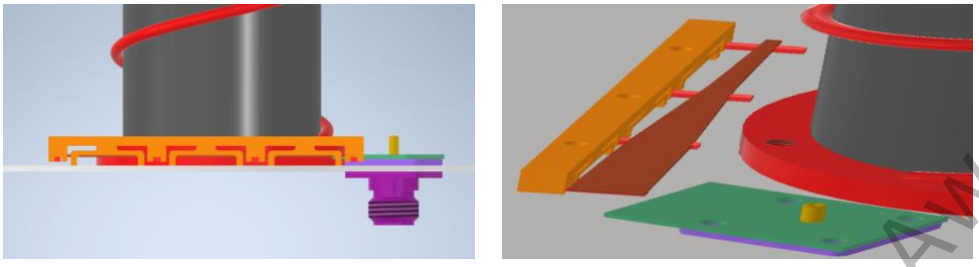


(b) 输入阻抗 Smith 圆图

图 3.6 渐变线全波仿真结果（图中约 1.4 GHz–1.6 GHz 附近的输入点已接近 50 Ω 区域）

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

为了方便准确调节空气间隙进行阻抗匹配的精细调整，我们还设计了利用塑料的弹性进行间距微调的阻抗匹配微带线的安装机构，如图 3.7 所示。



（a）装配后的侧视剖面　　（b）分解视图

图 3.7 空气悬置渐变线与 3D 打印可调基座结构

如图 3.8 所示，一开始我们利用了学校的一台激光打标机切割了 0.2mm 的薄铜皮进行实验，并利用 3D 打印支架维持其相对金属地板的高度。这样设计的目的是通过在一定范围内调整空气间隙补偿实际切割宽度、导体厚度和装配误差。



图 3.8 渐变匹配结构的激光试验件切割过程

完成所有设计和薄铜皮初步验证后，我们将 dxf 文件发送给网上找到的激光切割加工商家用 0.8mm 厚的铜片制作了阻抗变换器以获得更好的稳定性，并用强度更好的 3D 打印材料 PETG 打印了阻抗变换器安装架。铜带由一件 3D 打印的条形基座架起、悬置于铝地板上方，铜带与地板之间以空气作为介质，空气的相对介电常数近似为 1，空气悬置结构能够降低介质材料对有效介电常数及介质损耗的影响。3D 打印基座沿长度方向设有多个螺纹紧固点，通过螺钉将铜带压持于设定高度，并可微调铜带与地板之间的间距。铜带一端连接至螺旋馈电基座，另一端经铜箔与低噪声放大器电路板的输入端相接。采用空气介质的优点是介质损耗趋零、有效介电常数不随板材批次离散或频率色散而变化，特征阻抗仅由导体与地板的几何比例决定。经过安装测试，该设

2026 Yau High School Science Award
仅用于2026年成相中学科学奖论文公示

计不仅能稳固地安装阻抗变换器，还能够精确地调整间隙并保持高度稳定。

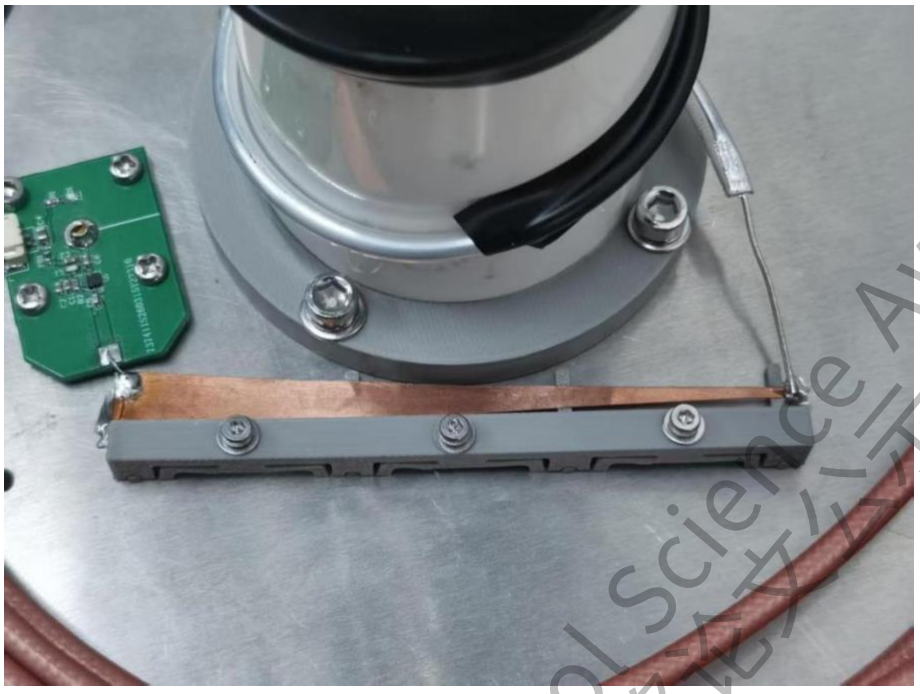


图 3.9 馈电基座、3D 打印气隙可调基座与铜带渐变线匹配网络

安装完成之后用矢量网络分析仪进行了阻抗匹配性能的测试，测试所用的设备为 Rohde & Schwarz ZVR 矢量网络分析仪，测试方法为将螺旋天线接入阻抗变换器高阻端，低阻端通过射频接头接入矢量网络分析仪端口 1，测量频率范围设置为 0.5—3 GHz，并在后续测量所使用的频率 1.42 GHz 和 1.575 GHz 设置 Mark 点，实际测量结果如下：



图 3.10 右旋天线 S11 测量值

2026 Siyau High School Science Award
仅用于2026上海中学科学奖公示



图 3.11 左旋天线 S11 测量值

从测量结果可以看出，左旋和右旋天线在 1.42 GHz 和 1.575 GHz 两个工作频点附近均具有较好的阻抗匹配。以其中一个测量点为例，Smith 圆图由测得的 S_{11} 换算得到输入复阻抗约为 $53 + j\ 1.697\ \Omega$，其电阻分量接近标准 50 Ω，电抗分量较小，说明经过 Klopfenstein 渐变线匹配后，天线端口阻抗已较好地变换至 50 Ω 附近。

3.1.3 低噪声放大（LNA）模块设计与噪声性能分析

本设计的天线增益采用 3.1.1 节的经验公式估算，约为 18 dBi。该增益来源于天线对特定空间方向电磁波的定向接收能力，并非由外部电源驱动的有源放大。但光靠天线的增益对于后续的 SDR 仍然过于微弱，因此需要在前端使用低噪声放大器（LNA）对信号进一步放大。

由于放大器会将有效信号和噪声一起放大，而同轴传输电缆会引入额外的热噪声，因此 LNA 必须紧邻天线后端，避免在二者之间使用传输线而引入额外损耗与噪声。LNA 本身也会产生噪声，因而其设计必须考虑尽量降低噪声。LNA 噪声来源主要是放大电路的本底噪声和电源噪声，因而在设计时需要尽量降低这两部分噪声来源。

经过查找我们发现 Qorvo 的 QPL9547 是目前市面上容易买到的 LNA 芯片里噪声系数最低的一款，工作带宽为 0.1—6 GHz，涵盖了本项目所需要的 1.42 GHz 和 1.575 GHz，而且电路非常简单，因此我们决定选用该芯片制作 LNA。芯片基本参数如下图：

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示



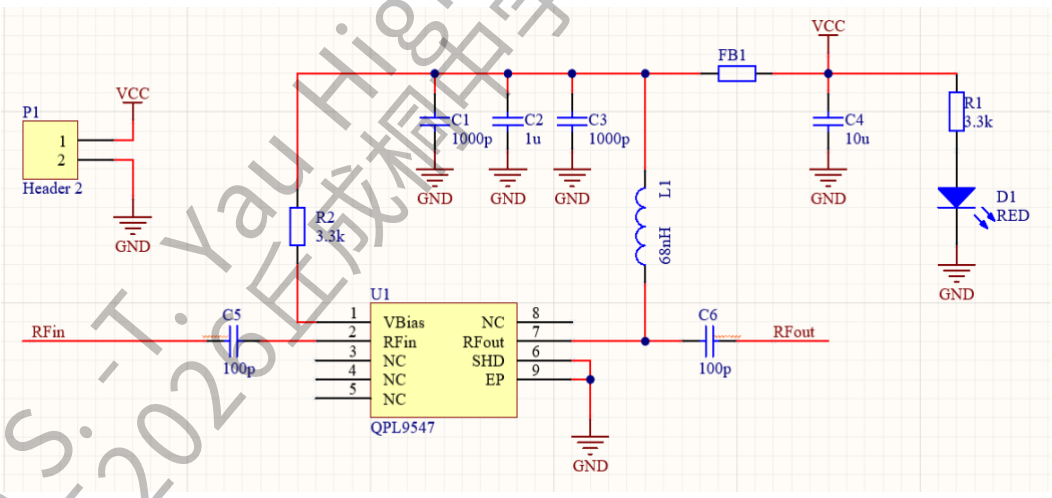
8 Pin 2X2 mm DFN Package

Key Features

- 0.1-6 GHz Operational Bandwidth
- Ultra-low noise figure, 0.3 dB NF @ 1.9 GHz
- 39 dBm OIP3
- 19.5 dB small signal gain
- Bias adjustable for linearity optimization
- Unconditionally stable
- Shut-down mode pin with 1.8V logic
- Maintains OFF state with high Pin drive

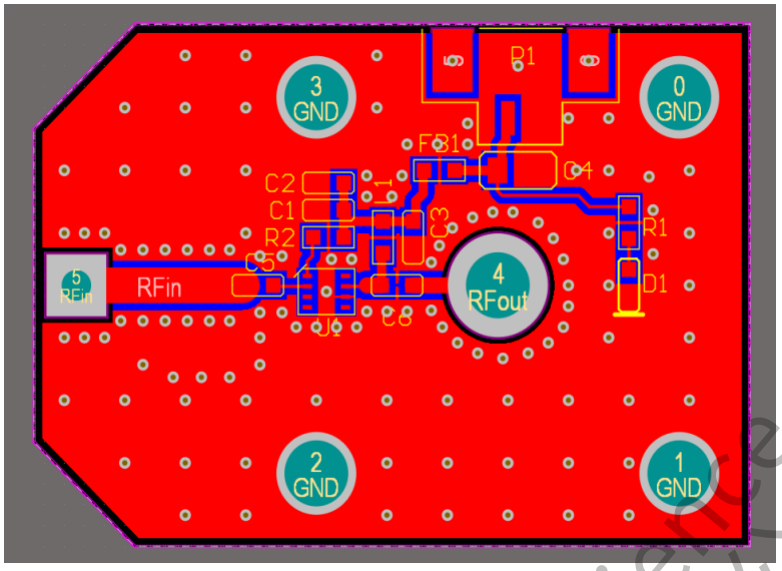
图 3.12 QPL9547 基本参数

根据器件参数给出的参考电路，我们用 Altium Designer 绘制了原理图并设计了 PCB：



(a) LNA 偏置与去耦电路

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示



(b) PCB 版图

图 3.13 基于 QPL9547 的 LNA 电路设计

其中，C5/C6 用于射频隔直，L1 承担射频扼流/偏置馈电功能，多级电容与磁珠用于抑制供电噪声。R1 与 LED 构成电源指示支路。

该设计包含隔直电容（C5/C6 100p），射频扼流电感（L68nH），多级电源去耦电容与电源指示 LED 的专用 PCB。LNA 提供约等于 19.5 dB 前端增益，将后级传输线与 SDR 接收机的噪声折算贡献压制到最低。

低噪声放大器的级联系统噪声由 Friis 公式控制，其表达式为：

$$F_{\text{tot}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \cdots \tag{3.1.1}$$

其中，F_1、F_2、F_3为各级噪声因子，G_1、G_2为相应各级功率增益，均采用线性量；Ftot 为级联系统总噪声因子。因此，第一级放大器应尽量靠近天线，并同时具有较低噪声系数和足够增益。制作完成后的 LNA 集成于一块小型印制电路板上，安装于地板并紧邻匹配网络输出端。电路板以四颗螺钉固定于地板，核心为 Qorvo QPL9547 LNA 芯片（图 3.14 中央的小型贴片器件），其周围配置输入/输出匹配、偏置与去耦元件（C1—C6、R1、R2、FB1 等贴片元件）；板中央的通孔用于引入铜带渐变线传来的射频信号。电路板由一枚小型锂聚合物电池经白色两针连接器（红/黑供电线）独立供电。放大后的信号经板上输出走线引至射频输出连接器。低噪声放大电路板实物如图 3.14 所示。

2026 Shanghai High School Science Award
仅用于2026上海高中科学奖公文公示

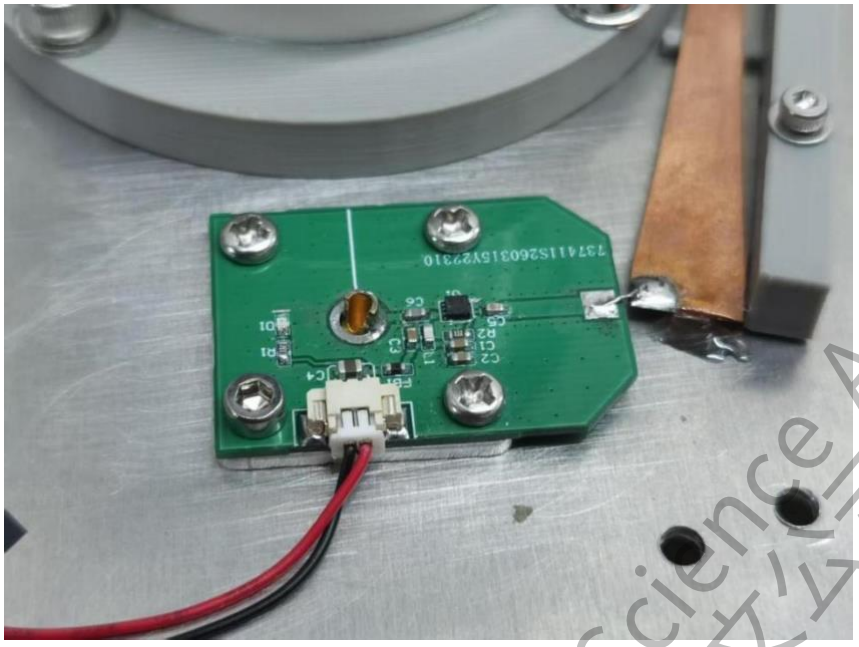


图 3.14 QPL9547 低噪声放大电路实物

3.1.4 软件无线电平台（SDR）的通道配置能力

系统采用 Microphase ANTSDR E316 软件无线电平台作为射频信号采集与数字化处理核心，该平台核心为 AD9361 高速 ADC/DAC 芯片，并配置了 FPGA 进行高速信号处理，支持两路接收（RX1、RX2）和两路发射（TX1、TX2）。具体参数如下：

资源特性

- Xilinx Zynq 7020（集成双核 ARM Cortex A9 和 Artix-7 FPGA）
- Analog Devices AD9361/9363
- 1 个PL侧的千兆以太网接口
- 1个TYPE-C USB2.0接口
- 1个TYPE-C USB-JTAG&UART接口
- 1个40-Pin 0.5mm间距FPC GPIO拓展口
- 1个外部 PPS/10MHz 参考输入接口
- 1个GPS同步输入接口
- 2 个发射通道和 2 个接收通道，支持半双工或全双工
- 灵活采样率的 12 位 ADC 和 DAC
- 集成射频前端（AD9361：70 MHz - 6 GHz，AD9363：325 MHz - 3.8 GHz）
- 可变模拟带宽（AD9361：200 kHz - 56 MHz，AD9363：200 kHz - 20 MHz）

图 3.15 Microphase E316 硬件资源

如图3.16所示，该平台面板提供TX/RX1、RX1、RX2、TX/RX2四个SMA接口，支持双通道同步采样，并具备通道间相位相干采集能力，可满足多路信号同步获取与

2026 S-T·YaoHigh School Science Award
仅用于2026年姚润中学科学奖论文公示

相关处理的需求。该平台的通道配置可根据具体测量场景灵活调整：在仅需获取单一信号源的场景下，可仅使用其中一个接收通道；在需要对多路信号进行相位比对或相关处理的场景下，则可同时启用双通道，利用其相位相干特性实现多路信号的同步采集。本系统后续被动式与半主动式两种测量模式即基于该平台的这一能力，分别采用不同的通道配置方案，具体接入方式将在相应章节中说明。



(a) 双螺旋与 ANTSDR 系统



(b) RX1/RX2 接收端口

图 3.16 两路天线直接接入 ANTSDR 的双接收通道

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

在软件方面 E316 基于 ADI 官方 Pluto SDR 系统，有着强大的软件生态，可以方便地用 GNU Radio、C++、libiio、MATLAB 及 Python 等工具进行开发。

3.1.5 微弱测试信号源

两种模式接收的信号均接近本底噪声，因此在进入外场测量前需要一个电平可控的信号源，用以独立检验接收链路是否正常。若直接用真实 GPS 信号做首次验证，接收失败时无法区分故障来自链路、指向还是卫星几何。

本研究采用 Rohde & Schwarz CMU 200 综合测试仪作为测试信号源，其发射电平可调且自带频谱分析功能，可对自身输出进行监测。将发射电平设为-50 dBm，扫描带宽 50 MHz（5 MHz/格）、分辨率带宽 1 MHz，实测输出如图 3.17 所示：载波峰位于设定中心频率处，高出本底约 3 dB，无明显杂散。可见该仪器在此量级上仍能输出可辨识的稳定载波，同时-50 dBm 已接近其频谱分析功能的本底，即为我们能独立确认输出存在的下限。后续第四章接收系统验证所用的信号电平即据此设定。

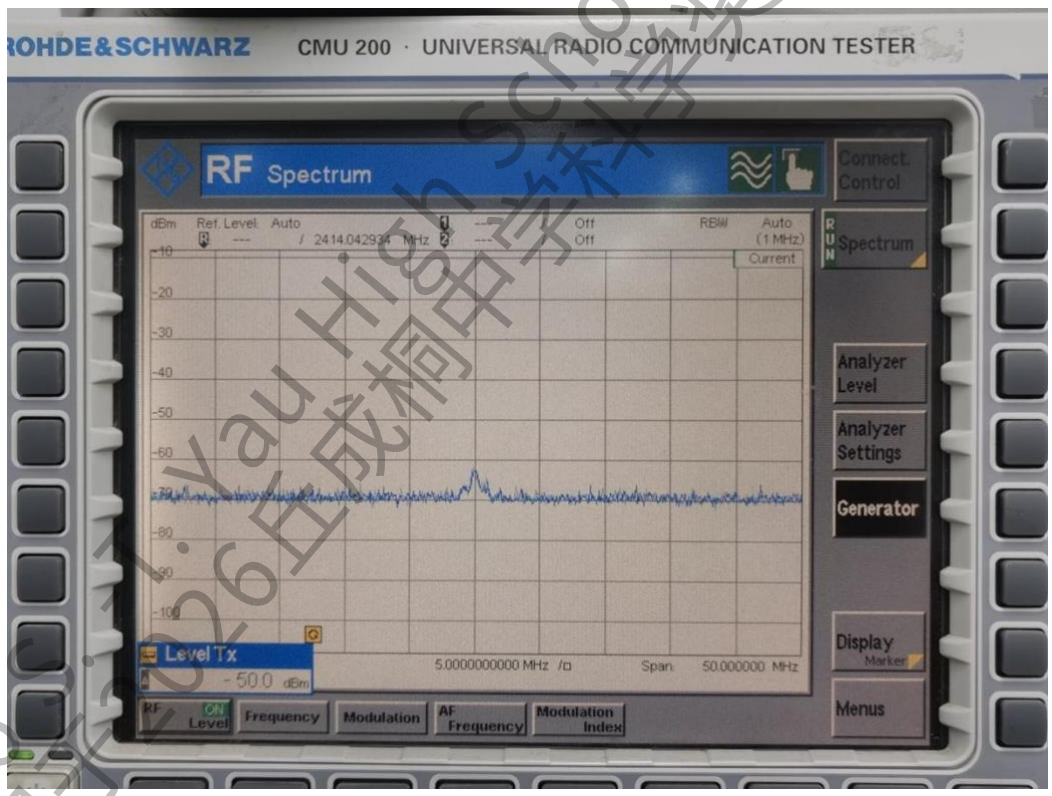


图 3.17 CMU 200 在 -50 dBm 发射电平下的输出频谱监测

3.2 系统成本核算

3.1 节中所用的各项材料与加工费用如表 3.2 所示。

2026 Yau High School Science Award 仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

表 3.2 自制部分材料与加工费用

项目	说明	金额（元）
塑料管	螺旋天线骨架	30
金属圆盘	天线反射板	50
LNA 芯片及元件	QPL9547，两套	120
射频电缆	天线至前端连接	300
3D 打印件	支架与固定结构	100
射频接头	SMA 等	20
阻抗变换器加工	激光切割	50
其他耗材	焊料、线材、紧固件等	100
合计		**770**

可见整套自制射频前端，包括两副圆极化螺旋天线、两路阻抗匹配网络与两路低噪声放大电路，材料与加工总支出不足八百元，其中占比最高的是射频电缆而非有源器件。需要说明的是，数字接收部分所用的 Microphase ANTSDR E316 为借用设备，未计入上表；该平台是本系统中唯一价格较高的环节，但属于通用型仪器，可在多个项目间复用，且随着软件无线电平台的普及，同类设备的价格仍在下降。因此，本节的成本结论仅限于自制前端的材料与加工费用；纳入 SDR 后的整套系统造价有待另行核算。

2026 S.-T. Youth School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

第四章 被动式 L 波段辐射测量实验

4.1 测量原理与定标方法

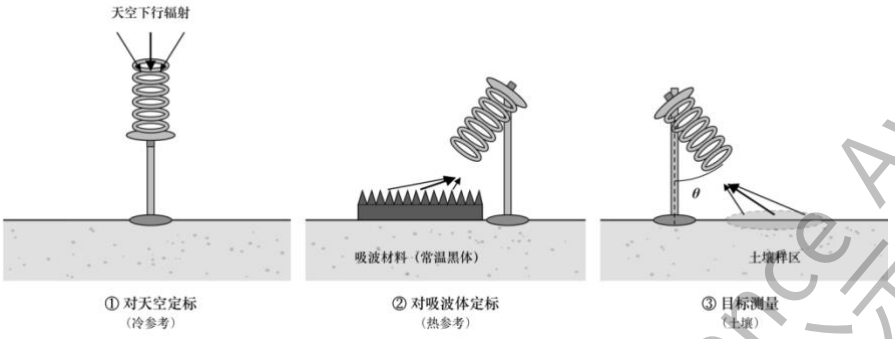


图 4.1 被动式测量示意图

被动式模式利用下视圆极化螺旋天线接收地表微波辐射。圆极化等效反射率与发射率关系见式(2.3.9)，亮温关系见式(2.4.1)。首先将天线依次指向有效温度已知的冷热参考及土壤目标，在固定接收设置下获得数字功率 Pc、Ph 和 Ps，使用式(2.4.4)解算目标天线温度。冷热两点同时确定线性关系的斜率和截距，之后按式(2.4.5)(2.4.6)用 Y 因子估计接收机噪声温度。

本章先检验接收链路对不同输入状态的响应，再以冷热参考建立功率到天线温度的定标关系，最后在给定温度和地表条件下计算介电常数与体积含水量。



图 4.2 被动式整体逻辑链路

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

4.2 实验配置

4.2.1 设备连接与 SDR 采集参数

设备连接方式如下：

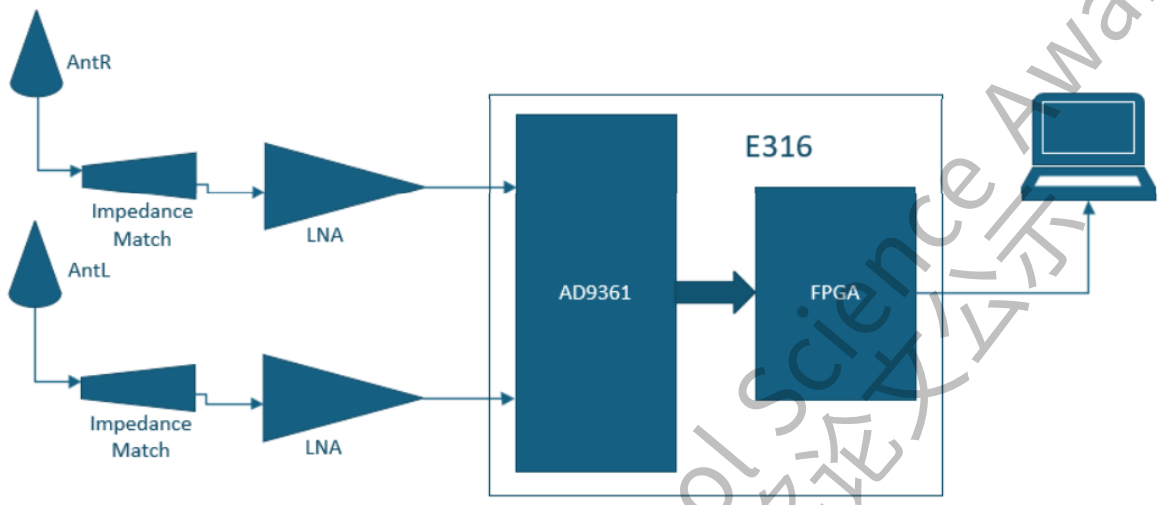


图 4.3 系统连接方式示意图

将天线用 RG142 电缆连接到 E316 设备，一端为 SMA 接头驳接 SDR 设备，一端为 N 型插头接入天线背面插头。其中 RHCP 天线接到 RX1，LHCP 天线接到 RX2。然后用千兆网线将 E316 连接到笔记本电脑，同时用 USB 进行供电。连接完成后接通 LNA 的电源即可开始测量。

4.2.2 标定物理量测定

我们以天空作为冷参考，采用反射率接近零、因而发射率接近 1 的微波黑体作为热参考源，由于η_B接近于 1，其物理温度可直接测量。地面同步观测须提供土壤物理温度T_s；地表均方根高度，用于确定 Choudhury 模型的粗糙度参数h，因单观测量无法反演h，该项成为反演误差的主要来源；为验证绝对精度，后续还需由 TDR 或 FDR 在足印内多点取样求均值，获得地面真值含水量。

4.3 实验流程

实验按五个步骤执行：测量前准备与链路自检、天线温度测量、对天空定标、目标测量与对比、反演与精度评价。第三步与第四步交替进行，流程如图 4.4 所示。

2026 Yau Hing Tsai School Science Award
仅用于2026年成桐中学科学奖论文公示

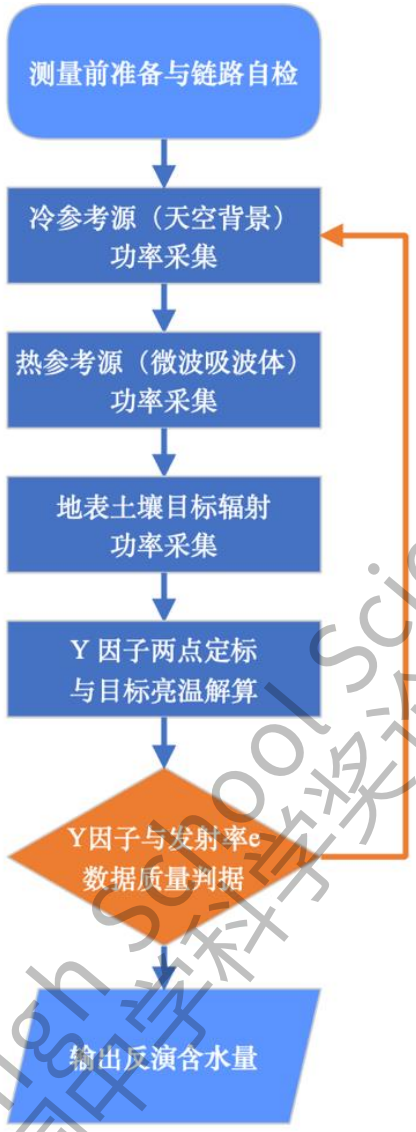


图 4.4 被动式土壤湿度测量实验流程

1）测量前准备：在进行测量前，需要确定各个部分均工作正常，步骤如下：设备自检。

➢ 设备连接检查，确认各个射频接头都可靠连接；

➢ LNA 供电系统检查，连接上电池之后看电源指示灯是否亮起。

➢ 连接 SDR 设备，用网线连接 Microphase E316 和电脑，并用 USB 线连接供电端口。运行 SDRPP 软件，选择 Source 为 Pluto，并点击运行键，软件如果能够打开设备并显示瀑布图说明 SDR 设备工作正常。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示



图 4.5 SDRPP 连接 E316，右侧暗线可能是内部信号泄漏

➢ 用信号发生器发射一个频率为 1.575GHz 的微弱信号，并将 SDRPP 接收频率调整到 1.575GHz，并接通 LNA 的电源。这一过程中 SDRPP 的瀑布图应呈现明显的三段，对应无信号、有信号但 LNA 不工作以及 LNA 开启的状态。

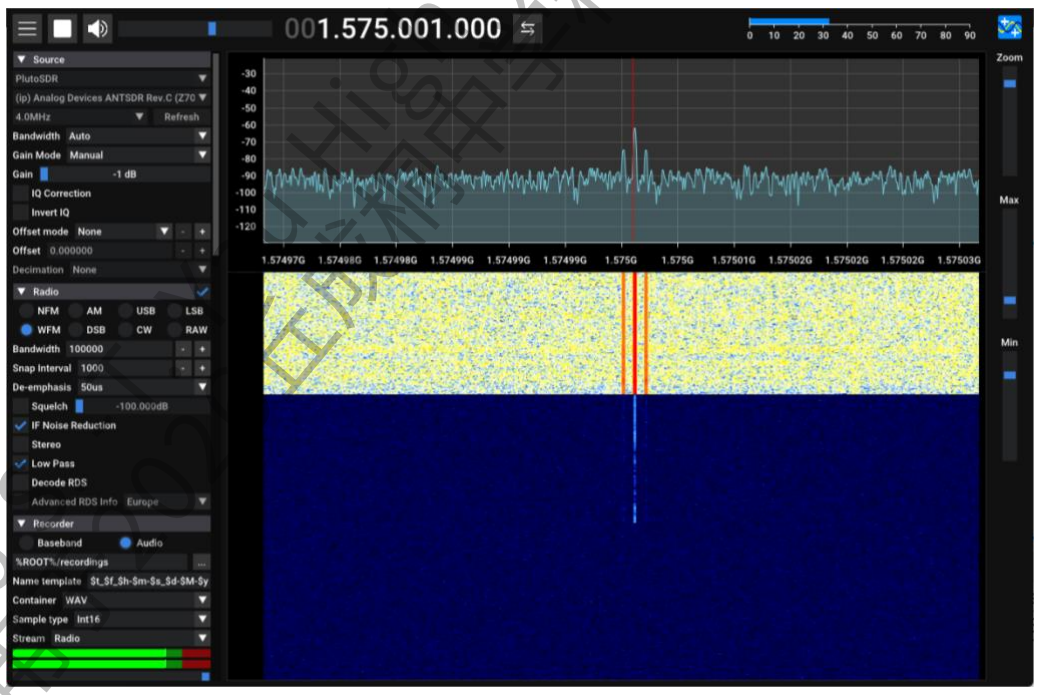


图 4.6 SDRPP 接收信号（红线有三条的原因是载波频率用 1 kHz 的信号进行了 AM 调制）

至此接收系统的工作状态已经全部验证完毕，天线、LNA 及 SDR 等各部分工作正常，可以进入下一步的测试工作。

2）外场数据采集。将天线指向待测目标并保持稳定，按设定时长采集 IQ 数据。由于单次功率测量给出的是与T_A线性相关但比例系数未知的量，所以根据功率与温度的关系式进行标定。外场采集状态如图 4.7 所示。

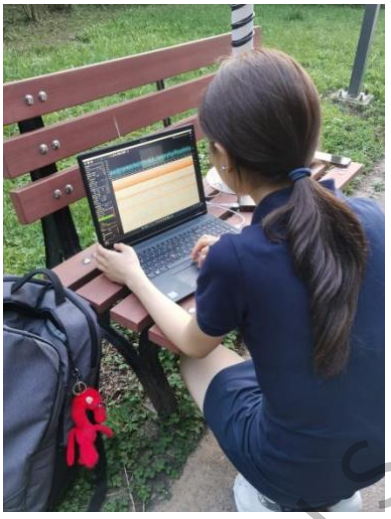


图 4.7 外场数据采集与上位机实时监视

3）冷热参考采集。在相对开阔方向采集天空冷参考，再采集吸波材料热参考，保持接收设置及处理带宽一致。用两点关系求定标系数，在满足偏置条件时计算 Y 因子及接收机等效噪声温度。

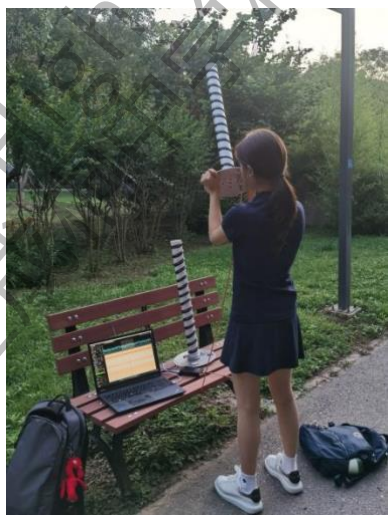


图 4.8 冷参考观测(室外开阔环境下天线指向高仰角天空)

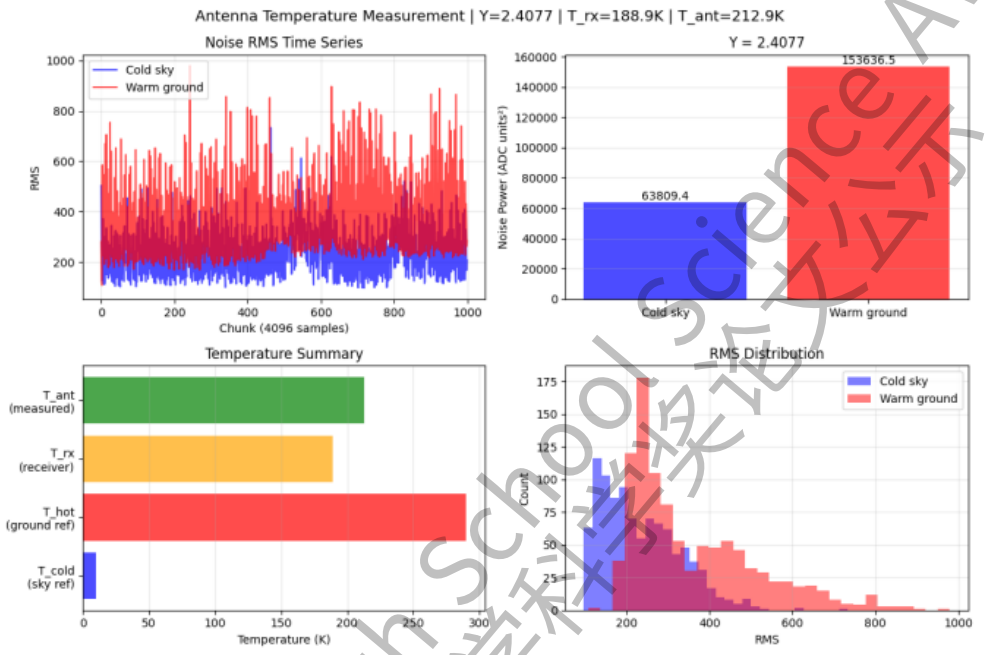
4）目标观测。将天线指向土壤样区，采集目标功率，并用同轮定标系数换算天线温度。在给定波束近似下得到地表亮温。

5）反演与结果检查。按 2.4 节求有效发射率，再按 2.3 节求介电常数，再由第 2.6 节的介电常数—含水量转换关系得到估计。检查输入与物理约束；独立地面参照齐备后，再计算偏差和离散指标。

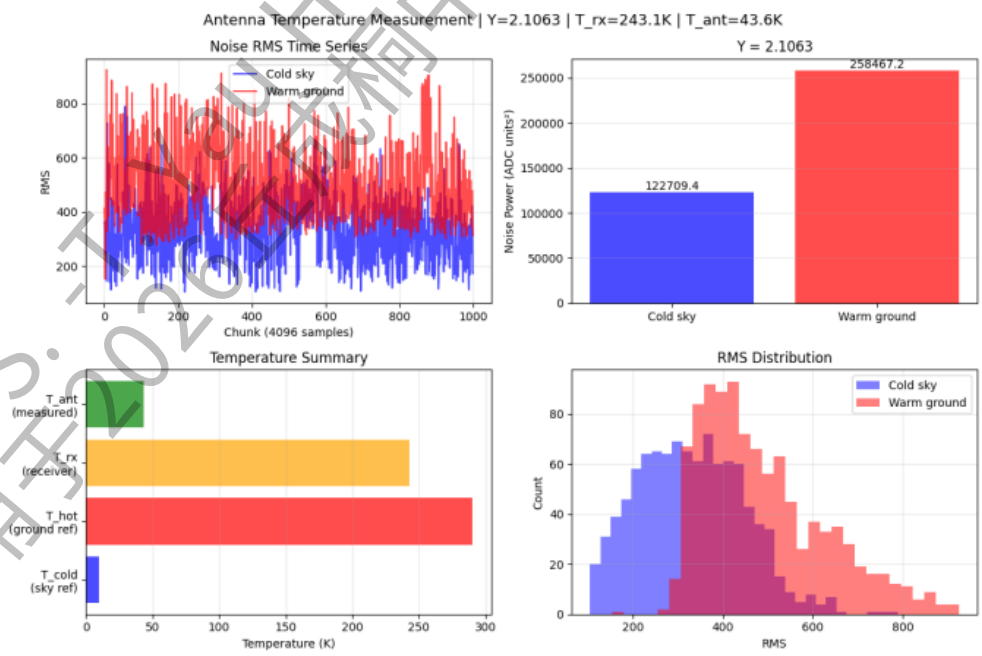
2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

4.4 接收链路运行验证

正式观测前，先进行天空—地面指向切换实验，以验证接收链对不同亮温状态的响应。天线先指向天顶采集冷空数据，再翻转指向地面采集等长数据，过程中 SDR 增益、采样率及带宽保持不变。每次采集 1000 个数据块，每块 4096 个复 IQ 样本，并计算分块功率及全时段平均值。结果如图 4.9 所示：



第一组验证结果



第二组验证结果

图 4.9 天空与地面指向切换的两组运行验证结果

2026 S. Tianyu High School Science Award
仅用于2026江苏省中学科学奖论文公示

两组结果图的子图布局相同：左上为两状态的分块均方根值随块序号的变化，右上为平均噪声功率对比，左下为解算所得的温度汇总，右下为分块均方根值的直方图。

两次测量得到的功率比分别为 2.408 和 2.106，均明显大于 1，说明天线由天空转向地面后接收功率稳定增加，系统能够分辨输入亮温变化。

该实验仅用于验证接收链的温度响应能力。实验代码采用 Python 编写，利用了 ADI 库进行 SDR 控制和数据采集，并用 matplotlib 绘制图像，部分代码如下：

```
天线温度测量程序 (Y-factor 法)
硬件: Microphase E316 (AD9361), CH0 = 螺旋天线 (频率见 CENTER_FREQ)

测量方法 (两步标定 + 一步测量) :
  [标定] 用已知温度的冷/热源求接收机噪声温度 T_rx
    1. 天线指向天顶 (冷空 T_cold) → 噪声功率 P_cold
    2. 天线指向地面 (暖负载 T_hot) → 噪声功率 P_hot
    3. Y = P_hot / P_cold
    4. 由 Y = (T_hot+T_rx)/(T_cold+T_rx) 解得:
         T_rx = (T_hot - Y*T_cold) / (Y - 1)
  [测量] 指向待测方向, 用标定好的刻度求天线温度
    5. T_ant = (P_target/P_cold)*(T_cold + T_rx) - T_rx

注意: 两点法本身只能定出 T_rx; 要得到未知方向的 T_ant 必须做第三次测量。
功率均以去直流后的方差计算, 并检测饱和, 避免 DC 偏置/削波污染结果。
"""
import adi
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# ============ 参数配置 ============
CENTER_FREQ = 1_420_000_000    # 1575.42 MHz GPS L1 载波
SAMPLE_RATE = 4_096_000        # 4.096 MSPS
N_SAMPLES = 4_096_000          # 每次采集 1 秒数据 (4M 采样点)
RX_GAIN = 70                   # 手动增益 (固定, 避免 AGC 干扰)

# 1420 MHz 天顶冷空约 5~10 K (CMB 2.7K + 银河背景 + 大气) ,
# 1575.42 MHz 天顶冷空约 5~10 K (CMB 2.7K + 银河背景 + 大气) ,
# 含地面溢洒时可取更大值; 请根据实际频率/环境调整
T_COLD_SKY = 10.0              # 天顶冷空参考噪声温度 (K)
T_HOT_GROUND = 290.0           # 地面/环境温度 (K)

# ============ SDR 配置 ============
sdr = adi.ad9361("ip:192.168.1.10")
sdr.rx_enabled_channels = [0]
sdr.rx_lo = CENTER_FREQ
```

图 4.10 Python 程序示意

完整程序见附录 antenna_temp.py。

4.5 正式测量

在完成接收系统温度响应验证后，进一步开展土壤样区的被动微波亮温测量及土壤湿度反演实验。每轮实验包括冷参考、热参考和土壤目标三个观测状态，各状态均采集 1000 个数据块，每块 4096 个复 IQ 样本，且整个测量过程中 SDR 参数保持不变。冷参考亮温取$T_c = 10$K，热参考温度取$T_h = 290$K。土壤物理温度根据现场取 300K。IQ 数据按照第 2.7.4 节所述方法完成 Welch 谱估计、RFI 剔除及频带积分，得到冷参考功率P_c、热参考功率P_h和目标功率P_s。

目标亮温T_B由 4.1 节中两点定标得到。随后将T_B代入亮温反演模型，依次求得土壤发射率、介电常数及体积含水量。以上过程由 Python 编程实现，用到的库有 adi，

2025 S.-T. Yau High School Science Award 仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

matplotlib 和科学计算库 scipy，部分代码如下：

```
  4. 辐射方程: T_soil = ε·T_phys + (1-ε)·T_sky
     其中 ε = 发射率, T_phys = 土壤物理温度(温度计测), T_sky = 天空温度
  5. 解出 ε = (T_soil - T_sky) / (T_phys - T_sky)
  6. 法线入射 Fresnel: ε = 1 - |Γ|², Γ = (1-√ε_r)/(1+√ε_r)
     反演: ε_r = ((1+√(1-ε)) / (1-√(1-ε)))²
  7. Topp 方程: θ_v = -5.3e-2 + 2.92e-2·ε_r - 5.5e-4·ε_r² + 4.3e-6·ε_r³

注意:
  - 天线朝下时需贴近地面(<0.5m), 确保波束被土壤填满
  - T_phys 用温度计插入土表 1cm 测量
  - 天空测量避开太阳方向
  - 适用于平坦裸土或低矮植被表面
"""
import adi
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import time
from scipy.ndimage import median_filter

# ============ 参数配置 ============
CENTER_FREQ = 1_420_000_000    # 1.42 GHz (或改为 1_575_420_000)
SAMPLE_RATE = 4_096_000
N_SAMPLES = 4_096_000          # 1 秒数据
RX_GAIN = 60                   # 手动增益 (避免饱和, 按需调整)

# Y-factor 标定参考温度
T_COLD_SKY = 10.0              # 天顶冷空参考温度 (K)
T_HOT_REF = 290.0              # 暖负载参考温度 (K) — 用温度计实测后修改

# RFI 剔除参数
SPEC_RFI_THRESH = 12.0         # 频域阈值 (√背景均值) ; 误报率≈exp(-12)
SPEC_MF_WIN = 65               # 频域中 Review 1 file > 长 ✓
MAD_SIGMA = 4.0                # 时域 MAD 剔除阈值 (σ 倍数)
```

图 4.11 Python 代码示意图

完整代码请参考附录 ant_temp_soil.py。

本次实验在北京西北近郊某公园完成。测量地点为有一些稀疏植被的土壤，两天前刚下过雨，土壤不算特别干燥。测量用右旋天线及 RX1 通道进行测量，直立对准天空测量冷温，地面则铺上了吸波海绵地毯用于测量热端温度，如下图所示：



图 4.12 对准天空测量冷温

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示



图 4.13 地面铺上吸波毯用于测量热端温度

五次实验结果如图 4.14 至图 4.18 所示。

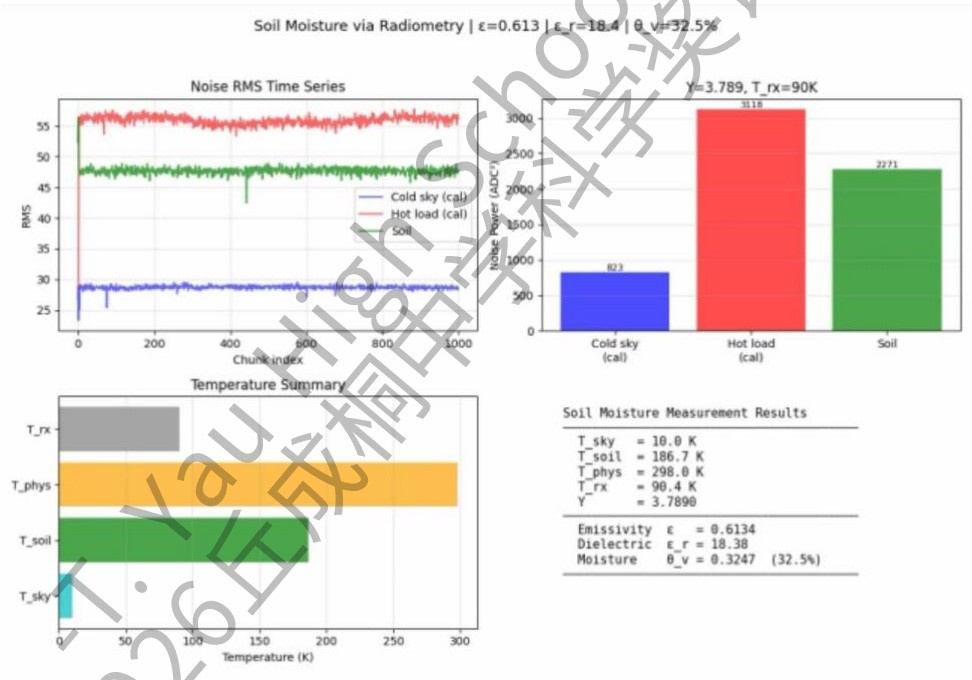


图 4.14 土壤湿度反演结果（测量 A，Y = 3.79）

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

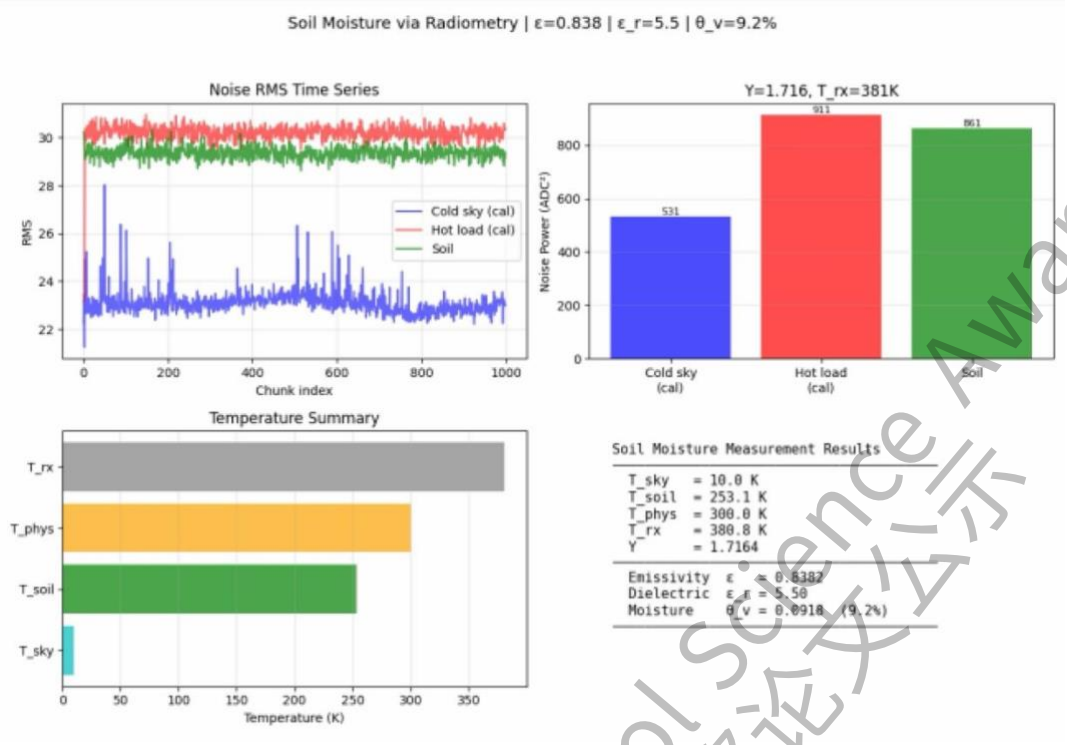


图 4.15 土壤湿度反演结果（测量 B，Y = 1.72）

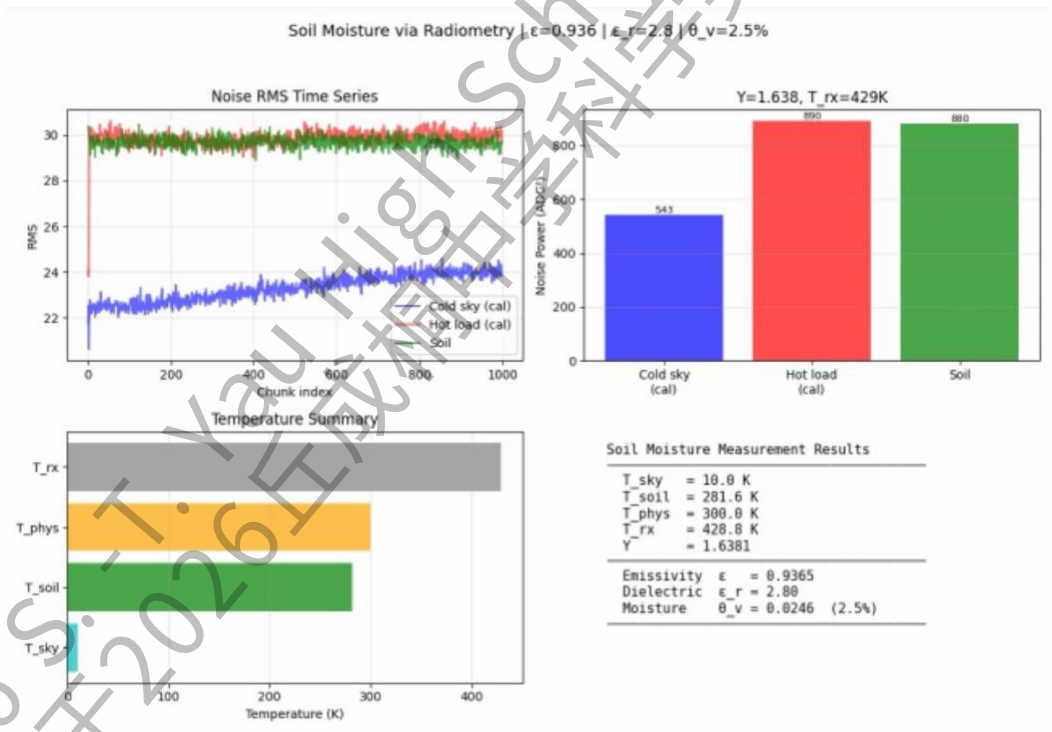


图 4.16 土壤湿度反演结果（测量 C，Y = 1.64）

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

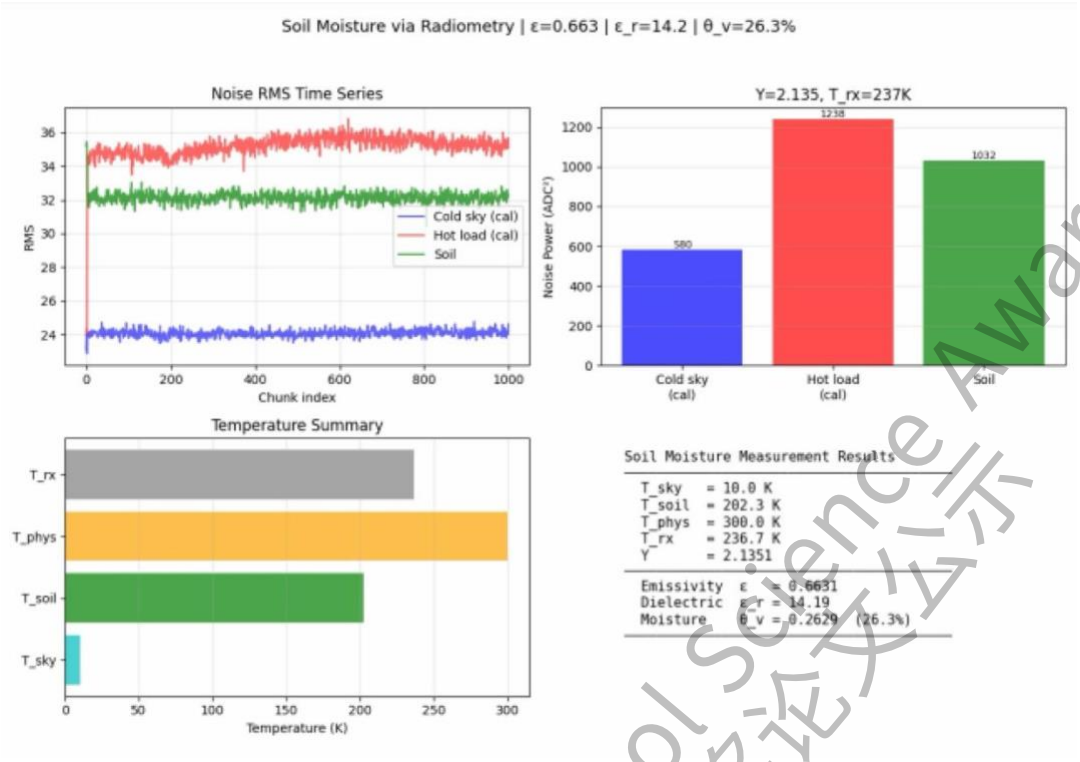


图 4.17 土壤湿度反演结果（测量 D，Y = 2.14）

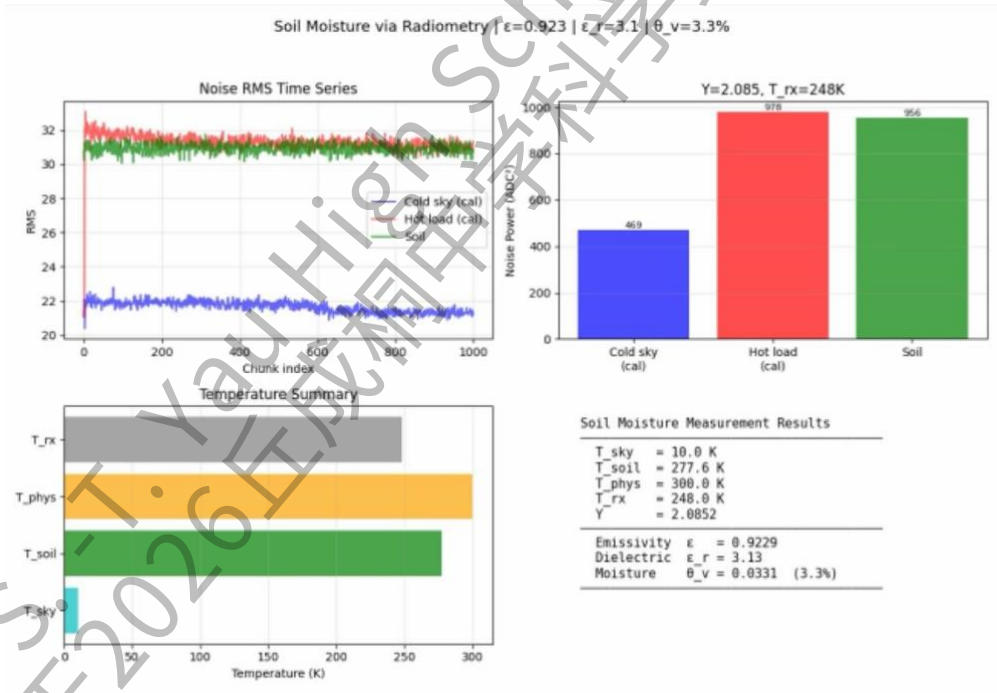


图 4.18 土壤湿度反演结果（测量 E，Y = 2.09）

各图左上为分块均方根时序，右上为冷热参考与土壤的数字功率，左下为温度汇总，右下为模型输出。读数汇总如下；表中含水量属于给定参数条件下的反演估计。

2026 S-T·Yau Hign School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

表 4.1 五次土壤湿度测量的读数与反演结果

量	A	B	C	D	E
冷参考功率 Pc	823	531	543	580	469
热参考功率 Ph	3118	911	890	1238	978
土壤功率 Ps	2271	861	880	1032	956
Y 因子	3.789	1.716	1.638	2.135	2.085
接收机噪声温度$\frac{T_{rx}}{K}$	90.4	380.8	428.8	236.7	248.0
土壤亮温 T_B/K	186.7	253.1	281.6	202.3	277.6
发射率 e	0.613	0.838	0.937	0.663	0.923
介电常数 ε_r	18.38	5.50	2.80	14.19	3.13
体积含水量 θ_v	32.5%	9.2%	2.5%	26.3%	3.3%

表 4.2 给出了 A, B 两组各 9 次被动式测量所得的体积含水量估计及其样本方差。样本方差按 $s^2 = \Sigma(\theta_i - \bar{\theta})^2 / (n-1)$计算，其中 $\bar{\theta}$ 为该组 9 次测量的平均值，$n = 9$。

表 4.2 两组被动式测量的体积含水量及样本方差

物理量/组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9
体积含水量 θ_v A: 湿润土壤	32.5%	28.5%	29.7%	30.5%	31.7%	32.3%	27.0%	30.8%	37.1%
样本方差 s^2	8.217 %²								
体积含水量 θ_v B: 干燥土壤	5.3%	7.6%	7.6%	8.6%	6.4%	9.9%	7.5%	11.8%	8.1%
样本方差 s^2	3.596 %²								

4.6 本章小结

五次外场被动式测量中，系统完成了给定定标温度与模型参数下的被动式采集和反演，即冷热两点定标、亮温解算、发射率与介电常数反演直至体积含水量估计，所得含水量估计分别为 32.5%、9.2%、2.5%、26.3%与 3.3%；发射率为 0.613 至 0.937，

2026 S.T. Yau High School Science Award 仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

介电常数为 2.80 至 18.38。表 4.2 中两组各 9 次测量的样本方差分别为 8.217 %²与 3.596 %²。这些结果说明定标与反演流程可以运行，输出为含水量估计；绝对精度仍需同位置、近同时的独立真值验证。通过上述实验我们已经得出了被动式测量的实验结果，接下来我们将进行半主动式测量实验并进行结果对比。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

第五章 半主动式测量实验

5.1 测量关系与简化条件

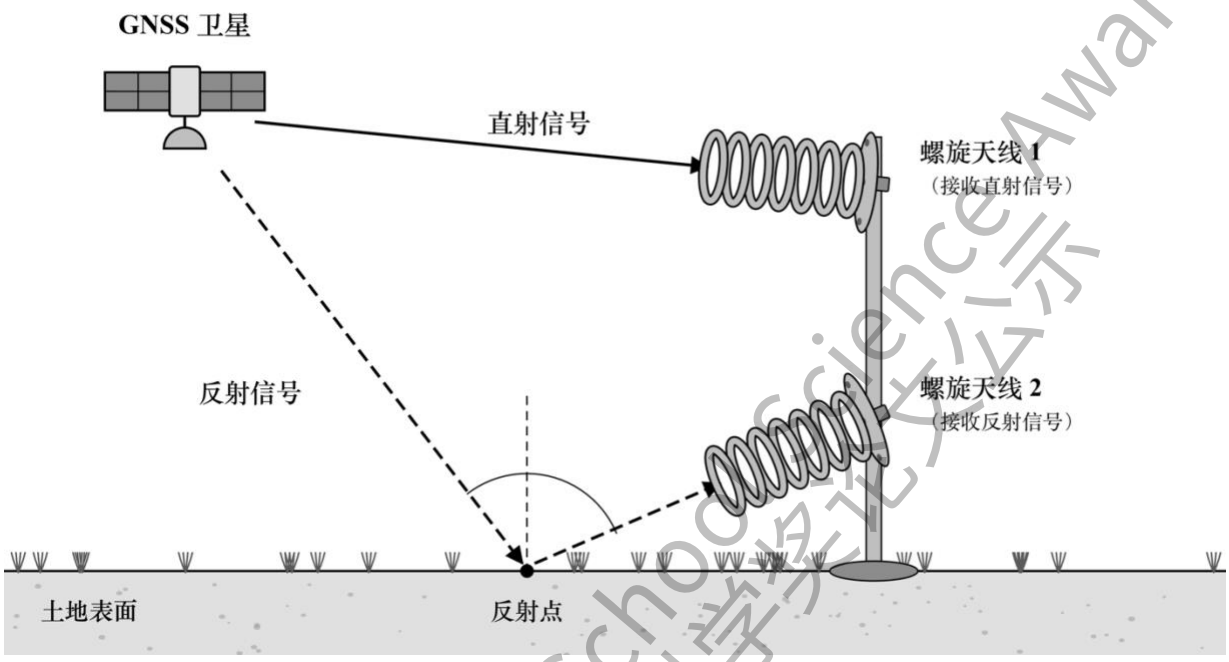


图 5.1 半主动式测量示意图

半主动式模式以 GPS 为外部照射源，同步获取直达与下视信号。两路净相关峰功率之比按式(2.5.5)建立关系，再由式(2.5.6)反演圆极化反射率，之后按实际接收极化分量反演介电常数与含水量。

使用功率比可以消去卫星发射功率等共同因素，但两路接收方向增益、电子链路差异和极化泄漏仍需标定。两路软件设置一致，但尚未对两路相对响应进行标定，本次反演暂假设相对增益因子 K=1。

以下实验先验证直达信号的捕获和连续处理，再观察双通道程序的输出。反演结果解释须同时考虑 5.5 节所述观测输入与极化模型问题。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

5.2 实验配置

5.2.1 天线系统与 SDR 配置

半主动式配置将上视天线记录为 RHCP、下视天线记录为 LHCP，分别连接 RX1 和 RX2。两路同步采样，保持相同采样率及滤波设置，并采用手动固定增益。



图 5.2 螺旋天线与 ANTSDR 系统

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示



图 5.3 半主动式通道配置（接入 RX1 / RX2 端口）

5.2.2 直达信号与反射信号分离方案

对于下视天线，反射的信号路径相较于上视天线而言要多$\Delta\tau = \frac{2h\sin\theta_e}{c}$的时间延迟。其中$h$代表天线高度，$c$为光速，$\theta_e$为天线仰角。估算发现整体的时间延迟在纳秒量级，远小于一个 C/A 码片（约 978 ns），说明直达与反射信号在时延域上不可分离，因此分离只能依靠天线的方向性。在实验过程中，我们选用波束较窄的天线，并且保证两个天线的指向呈镜像对称。

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

5.3 实验流程

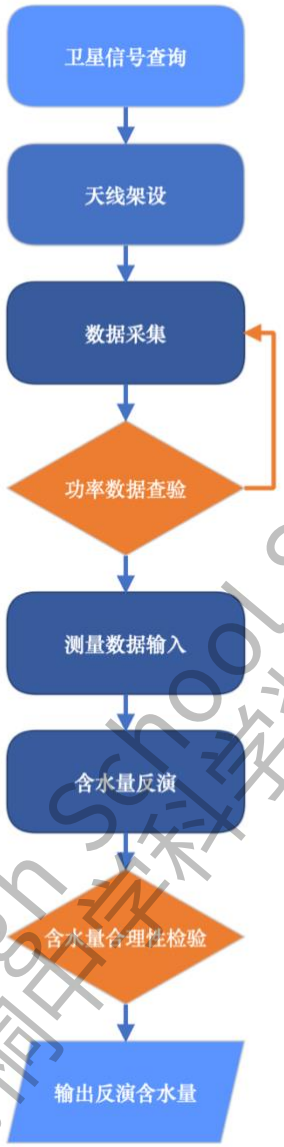


图 5.4 半主动式实验流程示意图

1) 查询卫星信号。根据手机端 GPSTest 软件查询目标卫星的仰角和方位角。

2) 天线架设。将上视天线按角度指向对应卫星在天空中的方位。下视天线保证时刻指向地面并且保证方向角与上视天线相同，俯仰角与上视天线呈镜像对称关系。数据采集。

3) 对两个通道进行同步采集：上视天线朝天对准目标卫星,接收未经地面的直达信号，记录功率P_d作为功率比的分母；下视天线对准镜面反射区,接收经地表反射的信号，记录功率P_R作为功率比的分子。保证$P_r < P_d$，若不满足，剔除数据。

4) 实地测量数据输入。实地测量得土壤温度为 300K，由于选择的是植被覆盖极为

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

稀疏的裸露土壤，所以无需引入植被光学厚度，实地测得地表均方根高度为 1.0 cm。

5) 含水量反演。根据实验方案设计中的反演步骤解算含水量。

6) 查验数据。地表功率反射率应在 0 与 1 之间,介电常数应在 3 至 40 之间，剔除不合格结果；与独立实测含水量的逐次对照将在后续验证中完成。

本次实验程序用 python 编写，用到的库主要有用于控制 SDR 系统的 ADI，用于绘图的 matplotlib 以及用于调用 c 语言编写的算法程序的 msvcrt 库。代码部分截图如下：

```
GNSS-R 土壤含水量测量（双天线反射率法）
硬件: Microphase E316 (AD9361)，L1 = 1575.42 MHz
  rx1 (CH0): RHCP 天线 (朝天) -> 直射信号
  rx2 (CH1): LHCP 天线 (朝地) -> 地面反射信号

原理: 土壤含水量 -> 介电常数 -> Fresnel 反射率 -> 反射/直射相关峰功率比
"""
import adi
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import msvcrt

# ============ 参数配置 ============
TARGET_PRN = 0                # 0=自动选择直射最强的卫星; 或指定 1-32
CENTER_FREQ = 1_575_420_000   # GPS L1 1575.42 MHz
SAMPLE_RATE = 4_096_000       # 4.096 MSPS (1ms = 4096 采样点)
CODE_RATE = 1_023_000         # C/A 码速率 1.023 Mcps
CODE_LENGTH = 1023
N_MS = 100                  # 每次采集毫秒数（非相干积分块数）
DOPPLER_MAX = 5000
DOPPLER_STEP = 250

# ---- 物理/标定参数（需按实际情况标定）----
ELEVATION_DEG = 60.0          # 卫星仰角（度）；需从星历/GNSS App 获取
CAL_OFFSET_DB = 0.0           # 两天线增益+链路差异标定偏移（dB），0=自动估算
EPS_DRY = 3.0                 # 干土介电常数参考值（用于自动标定）
EPS_IMAG = 0.0                # 介电虚部（损耗），干土约 0，可忽略
```

图 5.5 Python 程序示意图

完整代码请参考附录中 gnss_r_soil.py 程序。

5.4 直达通道运行验证

半主动式直达通道实验沿用前述被动式测量平台，其射频前端、AD9361 采集模块、数据传输接口及上位机均保持不变。上视接收链路依次由圆极化高增益螺旋天线、QPL9547 外置低噪声放大器和 AD9361 接收通道组成。

正式采集前，实验首先在室外相对开阔区域完成上视天线的架设，如图 5.6 所示。圆极化螺旋天线通过支架固定，使天线主轴倾斜指向开阔天空，以接收 GPS 卫星发射的 L1 直达信号。由于螺旋天线的功率波束较窄，所以同一时刻通常只能对准一颗 GPS 卫星。

2026 年 Tiyan Li 的毕业论文公示 Award 仅用于 2026 届成都电子科技大学 School of Science



图 5.6 半主动式直达通道实验中圆极化螺旋天线的现场架设

为记录试验地点的 GPS 卫星空间分布，实验使用手机端 GPSTest 软件进行辅助观测。图 5.7 显示，该时刻手机端记录到多颗 GPS L1 卫星，并给出了相应仰角和方位角。

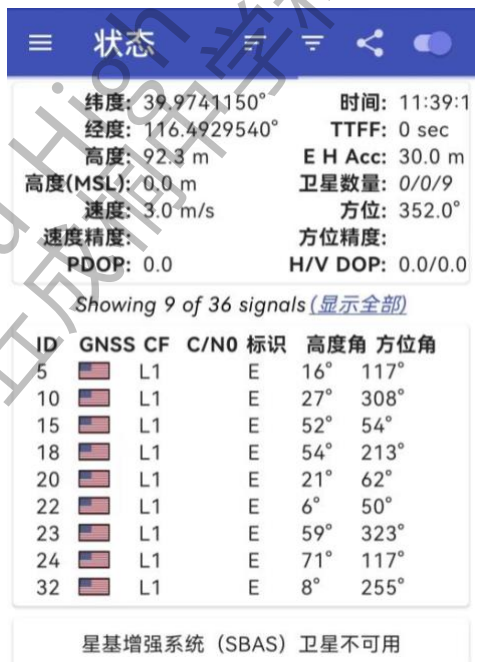


图 5.7 实验地点 GPS L1 卫星可见性及空间分布记录

完成实验设备架设后，将 AD9361 的接收中心频率设置为 1575.42 MHz，复基带 IQ 采样率设置为 4.096 MS/s，并采用手动增益模式。系统运行稳定后开始采集 GPS L1 复

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

基带 IQ 数据，并将数据传输至上位机，由全 PRN 搜索程序和单 PRN 连续捕获程序完成本地 C/A 码生成、码相位搜索、多普勒频移搜索、相关峰检测及 $\left(\frac{C}{N_0}\right)$估计。为了进行不同的验证，我们编写了用于多通道搜索的程序 gps_acquire.py 和用于单通道信号强度记录的程序 gps_acquire_single.py，分别用于 PRN 并行搜索和单通道 C/N_0的实时测量和记录。

5.4.1 全 PRN 并行搜索结果

为检验接收系统对不同 GPS C/A 码的搜索与辨识能力，程序使用 PRN 1—32 对应的本地 C/A 码分别与接收数据进行相关运算，并计算各 PRN 的载噪密度比。

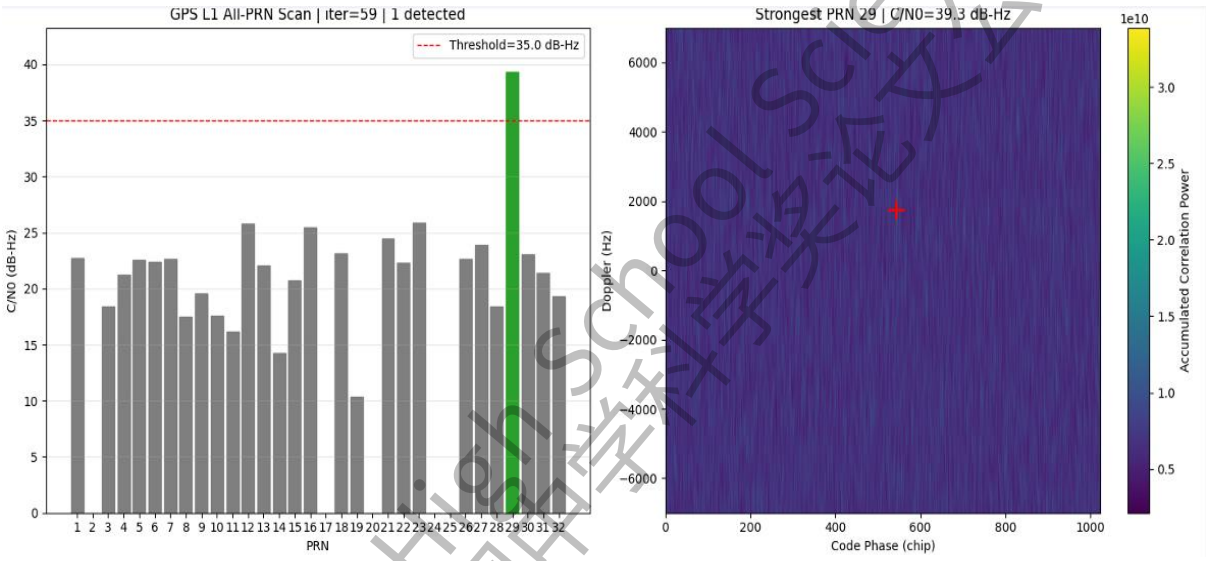


图 5.8 第一组全 PRN 搜索及 PRN 29 二维相关结果（By gps_acquire.py）

图 5.8 给出了第一组全 PRN 搜索结果。由图 5.8 左侧表格可知，在该次观测中，PRN 29 超过预设的捕获判决门限，被判定为该次观测中的有效捕获对象。右侧图表示载噪比最显著的 PRN29 对应的二维搜索的累积相关功率图，其中红色十字处表示对应多普勒和码相位下相关性最大值的位置。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

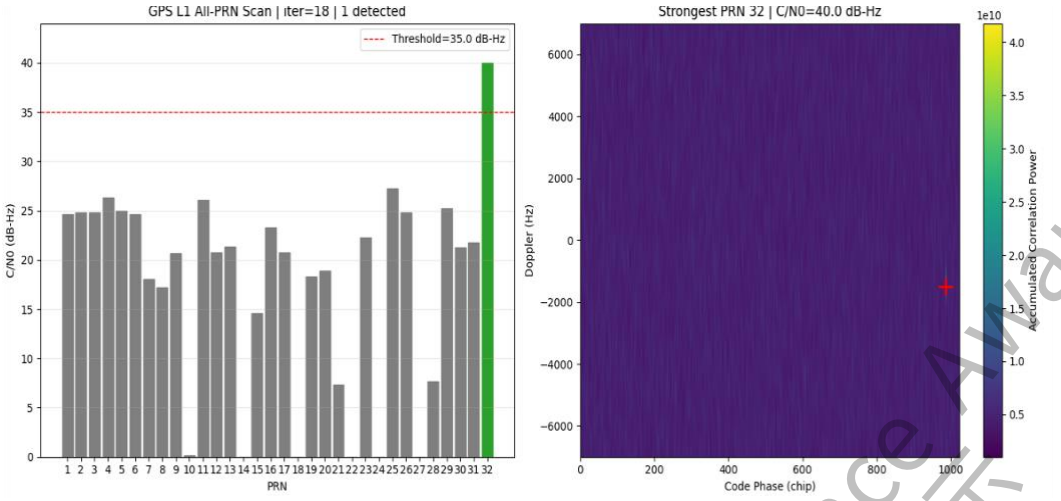


图 5.9 第二组全 PRN 搜索及 PRN 32 二维相关结果

同理，当上视天线的指向不同时，对于 PRN 的遍历实验检验发现 PRN32 的信号强度会显著高于预设门限。综合两组结果可见，上视天线指向改变时，被捕获的卫星随之改变，这与天线波束较窄、对不同方向 GPS 信号辨识能力较好的设计预期一致；两组有效捕获对应的多普勒频率偏移绝对值均小于 5kHz，说明所设置的搜索区间能够覆盖实验中出现的有效相关峰。

两组结果表明，接收系统能够利用不同 PRN 码之间的相关特性，从采集数据中搜索并辨识满足门限条件的 GPS L1 信号。

5.4.2 单 PRN 连续接收稳定性

为进一步检验上视直达通道的连续工作能力，实验分别固定 PRN28 和 PRN29，对连续采集的约 230 个 IQ 数据块进行重复捕获，并逐次计算$\left(\frac{C}{N_0}\right)$。

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

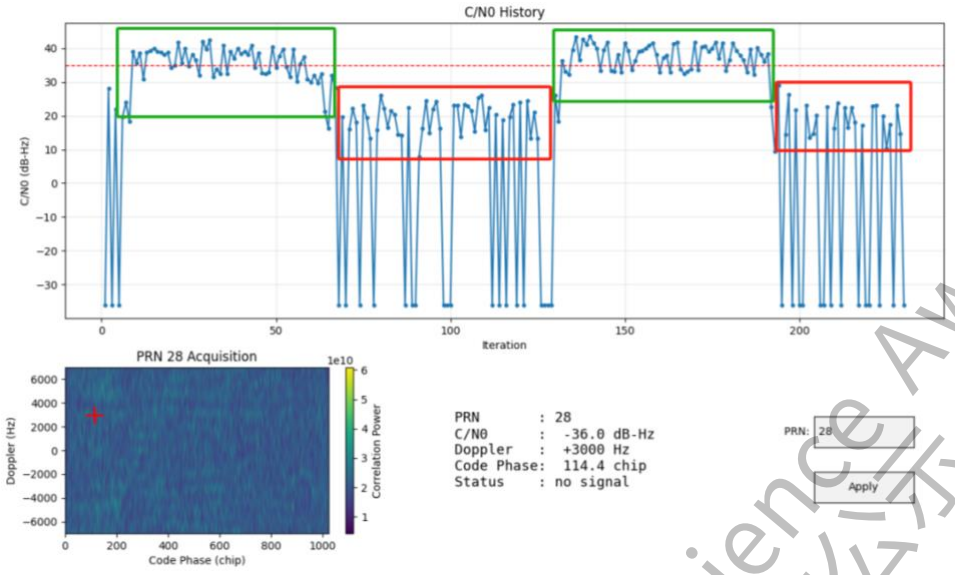


图 5.10 PRN28 连续捕获稳定性结果

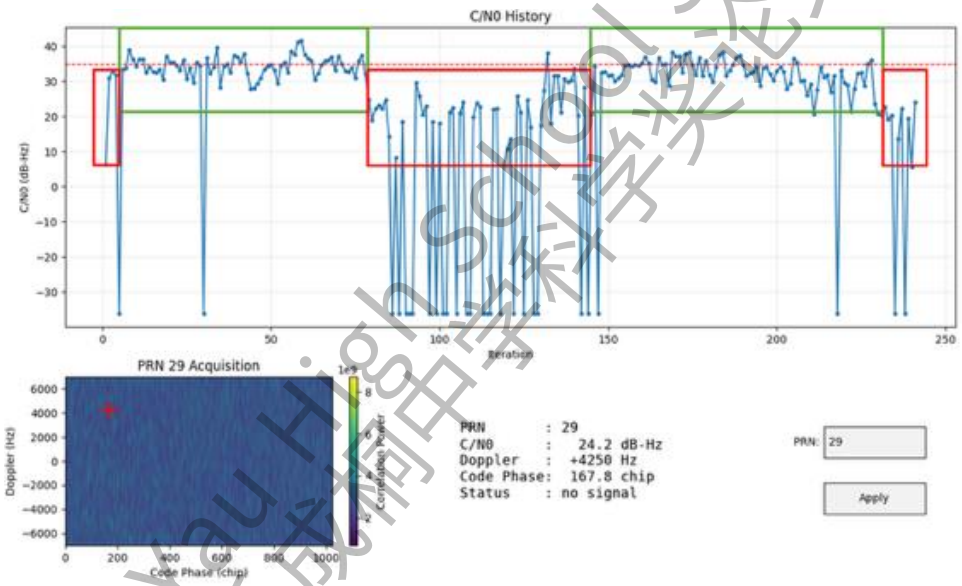


图 5.11 PRN 29 连续捕获稳定性结果 (By gps_acquire_single.py)

结果图分为上下两个部分，其中上半部分表示对于 PRN28 和 PRN29 进行连续约 230 次信号捕获，红色虚线代表预先设定的信号强度门限（35dB）。图中绿色方框标注的部分为将天线指向卫星方向，接收到信号强度在一段区间之内保持稳定与持续且显著高于设定门限的部分，为有效捕获；红色方框部分为将天线偏离卫星方向，接收到信号强度低于门限的部分，为无效捕获。下半部分为相应迭代下的码相位—多普勒二维相关功率图，红色十字标记为相关功率最大值的位置。

由结果图可知，PRN 28 与 PRN 29 在部分连续观测时段内均能被稳定捕获，说明上视直达通道能够在一定时长内持续接收和处理 GPS L1 信号。但曲线中也存在低于门

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

限、未能捕获的时段，因此天线指向、卫星运动及当时的传播条件都应作为影响接收稳定性的可能因素加以考虑。

5.5 正式测量

5.5.1 初测问题与条件调整

实验之初，我们选择在北京市酒仙桥开展室外测试，尝试利用上视与下视接收通道获取 GPS 直达信号和地表反射信号，并由两路相关功率进行土壤含水量反演。然而，初期实验未能稳定获得预期结果，主要表现为程序判定的有效数据点较少、反演结果连续性不足，以及含水量估计值出现较大波动，对介电常数的推算超出合理范围。经排查确认硬件无误后，我们将怀疑对象转向周围环境因素。酒仙桥初测地点周围存在树木，并且不远处有手机基站、公园 WIFI 广播系统、高压输电线等可能的干扰源，并且我们也曾携带处于开机状态的手机靠近接收设备。因此，我们将植被遮挡、多径传播和近距离电子设备干扰列为需要进一步排查的因素。

对于手机可能产生的影响，我们提出了电磁干扰假设。手机通信频段与 GPS L1 中心频率不同，并不意味着其一定不会影响接收系统：数字电路的时钟谐波和杂散辐射可能影响 GNSS 接收，较强的带外信号也可能使射频前端进入非线性工作状态，降低接收灵敏度[17]。

归纳初测问题后，我们将实验转移到北京市门头沟区潭柘寺镇杨坡园的山地开展。该地海拔 800 米以上，附近没有住宅和通信设备，实验时也未携带手机。接收平台沿用前次方案，同时进行直达与下视两类观测。调整实验条件后，现场能够较稳定地获得连续反演结果；这为分析初测问题提供了线索，也说明该方法在改善后的现场条件下能够输出连续、有效的数据。

5.5.2 数据采集

实验选取三块含水量各不相同的土地样本，分别是干燥接近砂质的土壤、有一些结块并且有少量草皮的土壤（杂草被清除）以及一块山地补水车刚浇过湿度很大的土壤。测试采用直达与反射通道的主从处理架构。上视通道接收 GPS 直达信号，完成码相位与多普勒频移的二维捕获；下视通道利用主通道提供的参考信息，在预测时延窗口内搜索地表反射信号。两路数据同步采集，并分别计算净相关峰功率。我们对三颗 GPS 卫星共执行六次观测。各次观测的卫星仰角均按 20°代入，反演经功率比、圆极化

2026 Si-Ti Yu Hui High School Science Award
仅用于2026年度科学实验大会

反射率、相对介电常数至体积含水量。

本文整理了 PRN 22、18、5 和 12 的 6 组观测记录，结果分别见图 5.12 至图 5.17。各图布局相同：左栏为直达（蓝）与反射（红）两路的净相关峰功率随迭代序号的变化，中栏为反解所得的相对介电常数，右栏为体积含水量。每幅图像给出该次观测的卫星编号、仰角、平均功率比、平均介电常数、平均含水量与有效点数。

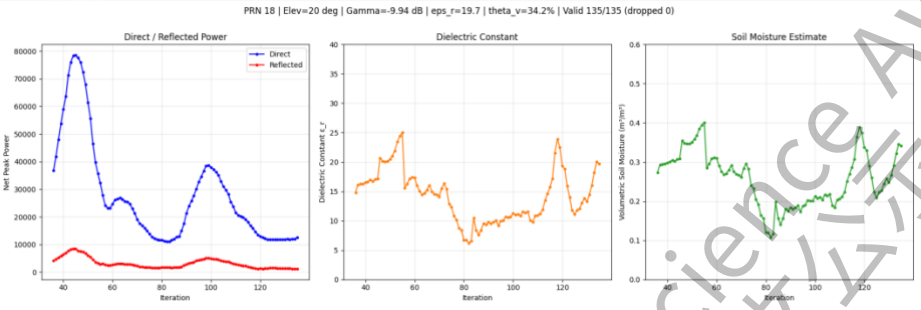


图 5.12 半主动式反演结果（半干土，PRN 18，$\Gamma = -9.94$ dB，$\theta_v = 28.2\%$）

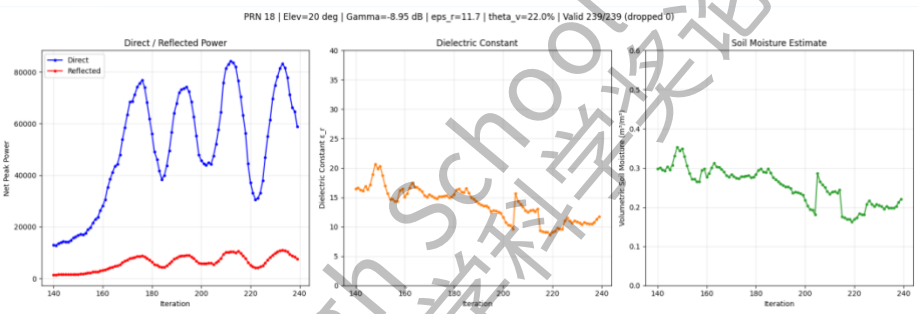


图 5.13 半主动式反演结果（干燥砂质土，PRN 18，$\Gamma = -8.95$ dB，$\theta_v = 26.0\%$）

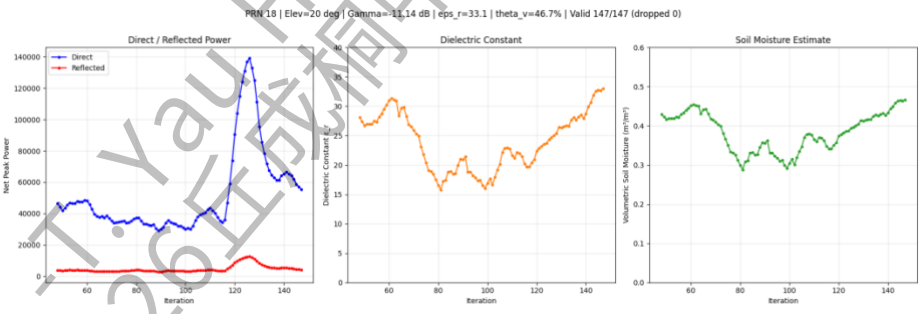


图 5.14 半主动式反演结果（高湿土，PRN 18，$\Gamma = -11.14$ dB，$\theta_v = 36.7\%$）

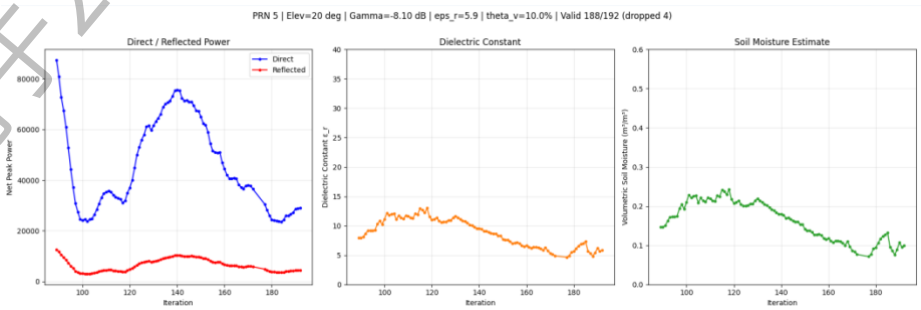


图 5.15 半主动式反演结果（干燥砂质土，PRN 5，$\Gamma = -8.10$ dB，$\theta_v = 17.0\%$）

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

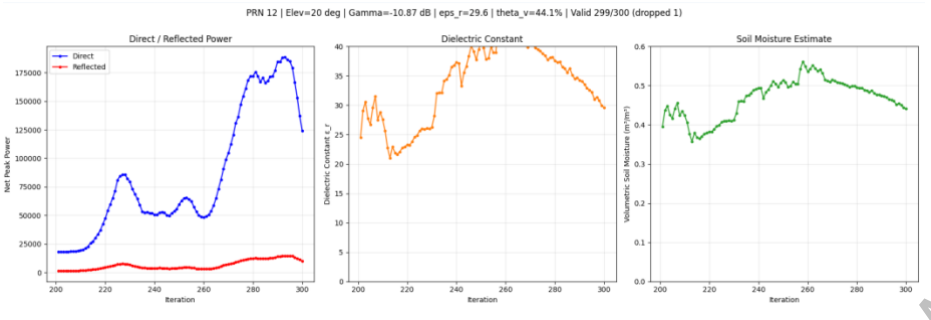


图 5.16 半主动式反演结果（高湿土，PRN 12，$\Gamma = -10.87$ dB，$\theta_v = 44.1\%$）

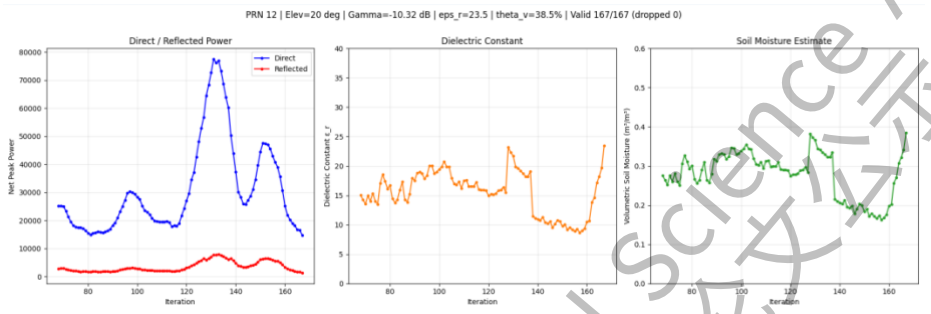


图 5.17 半主动式反演结果（半干土，PRN 12，$\Gamma = -10.32$ dB，$\theta_v = 38.5\%$）

六次观测的主要读数汇总于表 5.1。

表 5.1 六次半主动式观测的读数与反演结果

图号	PRN	仰角	Γ / dB	ε_r均值（估计）	θ_v均值（估计）	有效点数	θ_v 范围	土壤类型
图 5.12	18	20°	−9.94	15.4	28.2%	135 / 135	0.11 — 0.40	半干土
图 5.13	18	20°	−8.95	14.0	26.0%	239 / 239	0.17 — 0.36	干燥砂质土
图 5.14	18	20°	−11.14	21.8	36.7%	147 / 147	0.29 — 0.46	高湿土
图 5.15	5	20°	−8.10	9.1	17.0%	188 / 192	0.07 — 0.23	干燥砂质土
图 5.16	12	20°	−10.87	29.6	44.1%	299 / 300	0.36 — 0.56	高湿土
图 5.17	12	20°	−10.32	23.5	38.5%	167 / 167	0.17 — 0.39	半干土

5.6 本章小结

通过对 4 颗 GPS 卫星的 6 组外场观测，系统完成了直达与下视通道同步采集、净相关峰功率提取，以及基于功率比和圆极化反射模型的介电常数与体积含水量反演。各组含水量估计均值分别为 28.2%、26.0%、36.7%、17.0%、44.1%、38.5%对应的相对介电常数为 8 至 25，程序有效点比例为 86.3%至 100%。系统获得了连续模型输出，验证了双通道采集与处理流程的可运行性；含水量绝对精度仍需独立真值验证。

上述结果表明，半主动式测量能够获得连续数据并完成模型反演，验证了双通道

2026 S.-T. Yau High School Science Award 仅用于2026年成树甲学术奖论文公示

采集与处理流程的可运行性。需要说明的是，上述值是给定定标、极化模型及环境参数下的体积含水量估计，尚未验证绝对精度。若要得到更可靠的定量结果，还需要做两件事：1. 使用独立样本（如烘干法或经校准的探针）测定土壤湿度，与本系统结果逐次配对比较；验证所用数据应独立于拟合换算系数的数据。2. 射频信号接收的不确定性会使测量结果在短时间内有较大波动，延长积分时间可以降低部分随机波动，但不能自动消除定标偏差、通道增益差异、极化模型误差及粗糙度等系统误差，这些需另行校准或修正；同时应报告平均时长、独立重复次数和稳定性指标，并检查观测期间卫星角度或土壤状态是否变化。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

第六章 结论与展望

本文围绕田块尺度土壤水分的低成本连续监测问题，通过理论分析、硬件设计与外场实验相结合的方法，探究了被动式微波辐射测量与半主动式 GNSS-R 测量共用同一射频平台的可能性，实现了一套双模式微波遥感系统，并验证了该技术路径的可行性。

首先，对轴向模螺旋天线的辐射特性进行了理论说明与实测对照，以此检验设计和制作方法。天线的波束宽度、轴比和增益都与匝数、螺距角及反射板尺寸有关，各参数相互制约，需要通过仿真与试验反复修正才能达到满意的结果。所制天线结构简单，却能提供较高的定向增益和较好的方向分辨能力，在 L 波段弱信号接收中可考虑作为复杂阵列天线（多单元组合天线）的替代方案。

其次，本文利用空气悬置与机械可调气隙构造 Klopfenstein 渐变结构，以低成本实现宽带阻抗匹配。渐变线在理论上对介质厚度和线宽高度敏感，常规工艺中即使微小的误差也常使匹配点明显偏移；以空气介质实现渐变段并加入可调气隙，可以消除这类原本无法补救的误差（即把缺陷变为自由度）。经多轮调试，天线至 LNA 的匹配损耗已降到很低的水平。按同一思路设计并测试的低噪声宽带 LNA，在带宽内增益基本稳定。由此可见，弱信号接收性能不一定依赖昂贵材料或复杂工艺，关键在于让误差成为可控的变量。

此外，我们以多通道 SDR 接收结构和所制天线考察了弱信号的同步获取与卫星识别。GPS 信号在解扩前的功率低于本底噪声，单通道可完成卫星码捕获，双通道同步采样则为直达与反射观测的时序对齐和功率比反演提供基础；采样时刻、本振设定乃至搜索步长的任何失误都可能造成捕获失败。对系统作适当调节后，所指目标卫星可被清楚识别，并可获得 C/N_0 估计，表明本次实验的接收链路能够正常运行。

最后，从所研究的各种湿度条件下土壤样区的外场数据出发，可以检验双模式方法的效果。目前两种模式分别给出了输出，但尚未开展同地块、近同时、相近足印并带独立真值的配对对照。系统具备开展双模式交叉验证的条件，其一致性和精度仍待配对实验检验。

本研究仍有待深入。受目前外场条件和绝对标定资料所限，所得结论主要是趋势性的，系统的定量精度仍需验证。农田实际状况中的粗糙度、植被及温度差异都会使发射率和反射系数发生变化；本文反演对这些因素仅作了简化处理或假设，尚未进行

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026正大杯中学科学奖论文公示

敏感性与误差分解，它们是两种模式结果出现偏差的可能误差来源。今后拟用烘干法和 TDR 建立绝对标定关系，在反演中加入环境修正，并开展跨季节的长期观测，将稳定性纳入实际检验。

另外，该平台还有其他潜在用途。通过更换天线、调整中心频率或后端程序，这一接收方式还可用于精准灌溉、旱情预警等农业应用，以及射电天文等弱射频信号探测。

综上所述，本文提出了一种介于局部探针测量与大尺度卫星遥感之间的技术思路：在控制成本与系统复杂度的前提下，以两种模式观测土壤含水状态，并将理论与实测相结合，为田块尺度土壤水分的连续监测提供了一条工程上可行的实现路径。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

参考文献

[1] Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Martinuzzi, J., Font, J., & Berger, M. (2001). Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8), 1729-1735.

[2] Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, P. K., Crow, W. T., Edelstein, W. N., ... & Van Zyl, J. (2010). The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704-716.

[3] Houtz, D., Naderpour, R., & Schwank, M. (2020). Portable L-band radiometer (PoLRa): Design and characterization. *Remote Sensing*, 12(17), 2780.

[4] Zhang, R., Nayak, A., Houtz, D., Watts, A., Soltanaghai, E., & Alipour, M. (2024). Sub-Meter Remote Sensing of Soil Moisture Using Portable L-band Microwave Radiometer. *arXiv preprint arXiv:2409.17024*.

[5] Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T., & El-Rayes, M. A. (1985). Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(1), 35-46.

[6] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J-P, et al. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 666-687.

[7] Mironov, V. L., Dobson, M. C., Kaupp, V. H., Komarov, S. A., & Kleshchenko, V. N. (2004). Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(4), 773-785.

[8] Wigneron J P, Kerr Y, Waldteufel P, et al. L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) Model: Description and calibration over a priori knowledge of bare soils, winter wheat and grassland[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107(4): 639-655.

[9] Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E. D., Bilich, A. L., Braun, J. J., & Zavorotny, V. U. (2008). Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophysical Research Letters*, 35(17).

[10] Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E. D., Bilich, A. L., Axelrad, P., & Braun, J. (2008). Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results. *GPS Solutions*, 12(3), 173-177.

[11] Masters D, Zavorotny V, Katzberg S, et al. GPS signal scattering from land for moisture content determination[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004,

2026 S.T. Yau High School Science Award 仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

42(10): 2107-2114.

[12] Rodriguez-Alvarez, N., Bosch-Lluis, X., Camps, A., Vall-Llossera, M., Valencia, E., Marchan-Hernandez, J. F., & Ramos-Perez, I. (2011). Soil moisture retrieval using GNSS-R techniques: Experimental results over a bare soil field. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 210-224.

[13] Rodriguez-Alvarez, N., Bosch-Lluis, X., Camps, A., Aguasca, A., Vall-Llossera, M., Valencia, E., ... & Perez, I. R. (2011). Review of crop growth and soil moisture monitoring from a ground-based instrument implementing the interference pattern GNSS-R technique. *Radio Science*, 46(05).

[14] Chew C, Small E E. Soil moisture maps from the CYGNSS data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(17): 8943-8953. Ruf C S, Atlas R, Chang P S, et al. New ocean winds satellite mission to probe hurricanes and tropical cyclones[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(3): 385-395.

[15] Yin, C., Lopez-Baeza, E., Martin-Neira, M., Fernandez-Moran, R., Yang, L., Navarro-Camba, E. A., ... & Yang, D. (2019). Intercomparison of soil moisture retrieved from GNSS-R and from passive L-band radiometry at the Valencia Anchor Station. *Sensors*, 19(8), 1900.

[16] Klopfenstein R W. A Transmission Line Taper of Improved Design. Proceedings of the IRE, 1956, 44(1): 31-35.

[17] u-blox AG. GNSS antennas: RF design considerations for u-blox GNSS receivers: UBX-15030289-R03[EB/OL]. (2019-10-16)[2026-09-11].

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

致　谢

这项研究最初的起点，是我们在江西丘陵农田里看到的一幕。村里留守务农的多是上了年纪的人，腿脚已经不太利索，背着水管在坡地上来回走一趟要歇好几次。可就是这样一片田，坡上和坡下、向阳和背阴，土壤的干湿程度常常明显不同。什么时候该浇、哪一块该多浇、浇多少才够，全凭经验和手感来判断。我们看着村里老人一遍遍地在田里费力地行走，心里很不是滋味：如果能提前知道每一块田此刻究竟有多湿，可以省下那些不必要的路和不必要的水。

带着这个问题，我们查阅了现有的测量手段，发现它们分处两个极端：插入式探针准，但一根探针只能代表它周围几厘米，要覆盖一整片坡地就得插上几十根，成本和维护都不现实；卫星微波遥感覆盖广，可分辨率是公里级的，一整片丘陵在图上只是一个像素。农民真正关心的田块尺度，恰好落在两者之间的空白里。比较了多种方案之后，我们把方向定在 L 波段微波遥感上，希望用自制天线、自制射频器件加上软件定义无线电（SDR），搭出一套高中生也能做得起的测量系统，并最终形成被动式微波辐射测量与半主动式 GNSS-R 测量相结合的双模式方案。选题与技术路线都出自我们两人的讨论，没有任何人向我们指定或建议过这个题目。

研究由席齐远、黄会婧两名学生共同完成。席齐远主要负责实验部分，包括实验方案设计、部分相关理论公式的整理与计算，以及螺旋天线、阻抗匹配网络等设备的设计、制作、系统搭建与调试。黄会婧主要负责理论部分，包括资料查阅、理论模型研究、公式推导以及正式实验前的前置检验。研究后期，两人共同开展被动式与半主动式实地测量。在 GNSS-R 半主动式实验中，席齐远主要负责上视天线的架设与指向调整，黄会婧主要负责下视天线的架设以及被动式测量系统。实验数据全部由我们两人现场采集与记录，没有使用任何第三方数据集。数据整理阶段，席齐远负责相关捕获与功率比处理，黄会婧负责发射率、相对介电常数与体积含水量的反演计算，两人交叉复核彼此的结果。论文写作上，绪论与理论章节由黄会婧执笔，系统设计与实验章节由席齐远执笔，结论与展望、摘要由两人讨论后合写，全文由两人互校定稿。

在实验过程中，最让我们沮丧的是早期的 GNSS-R 外场实验。实验初期，我们采回来的数据大多无法使用，反演结果极其不稳定，没有任何规律。我们先怀疑是器件焊接问题，但是完整检查了天线系统到信号处理部分，每一级都运行正常。后来我们才意识到，问题在我们选择的试验地点：附近的植被遮挡了卫星的直达路径，周围的

2026 Tsinghua Undergraduate Science Award 仅用于2026年度清华大学本科生科学奖公示

电子设备又把本就低于本底噪声的信号进一步淹没了。我们重新选址，把整套设备搬到干扰更少的山地重做实验，数据的质量才明显好转。

另一个反复折磨我们的是阻抗匹配。连续渐变结构在纸上算得很理想，可它对加工尺寸极为敏感，我们委托加工出来的实物，测出的匹配点总是偏离设计值，而板子一旦做好就改不动了。试了几版之后我们换了思路：不如做一个可手动调节的阻抗匹配装置。于是我们把渐变段改成空气悬置，并加入可调的气隙结构，用实际调试去补偿加工误差。需要说明的是，这些零件是依据我们自己完成的设计文件，委托商家做激光切割与 3D 打印，外部人员只提供加工服务，不参与任何设计、测量与写作。

除此之外，我们还遇到了很多其他困难：很多知识超出了我们的课程范围，微波传输线理论、介电混合模型、相关捕获算法都是边查资料边啃下来的；外场实验只能安排在周末和假期，赶上天气不好就整天白跑；所有设备要靠人力搬到坡地上，供电、支架、指向全部要现场解决。也正是在一次次把设备扛上山的过程中，我们意识到：一套真正能用的农业技术设备，必须足够便宜、足够轻、足够省事，否则它永远无法应用于实验室之外的现实农田。

关于人工智能工具的使用，我们如实说明：2026 年 9 月论文定稿及研究过程中，我们使用了 Anthropic Claude（Opus 5，网页端），累计约 150 次对话，主要用于结论、摘要等文字的润色与精简、参考文献格式核对，以及部分 GPS 信号处理程序的编写、检查和调试。

研究的理论模型与公式推导、器件参数确定、实验方案设计与实施、数据采集、结果分析及最终结论均由我们独立完成。AI 未生成或修改实验数据与研究结果；所有 AI 辅助形成的文字和代码均由我们核对、测试并确认符合实际研究过程，最终责任由我们承担。

我们要特别感谢何道老师。何老师是我们的指导老师，是我们的学校物理老师，全部指导都是无偿的，不涉及任何形式的报酬。他的帮助集中在我们无法独立解决的理论问题上。在我们被数据卡住、几乎想放弃的时候，他一遍遍陪我们把思路重新捋清楚，让我们自己找到问题出在哪里。

我们还要感谢家人：感谢他们同意我们临时占用客厅和阳台，并在多个周末协助我们把较重的仪器运上坡地。

最后，我们要感谢那片让这项研究开始的田地，以及仍在田间劳作的人们。这项研究本身还不是问题的答案，但它让我们确信：物理学并不局限于教科书和理想模

2026 Y.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

型，它可以由一份真实而不完美的关心推动起来，而这份关心正是意义所在，也能帮助人们改善处境。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示