Design and Implementation of an Ethernet Twisted-Pair Cable Tester Based on Sweep Frequency Method and Intelligent Detection*

SONG Ruochen, XU Fengjin, XU Xinyu, YANG Kuo*
(School of Electronic Science and Technology, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China)

Abstract: The design and implementation of an integrated Ethernet twisted-pair cable tester based on an STM32 microcontroller is presented. The system employs a "core controller+multi-functional relay routing" hardware architecture to achieve integrated measurements of DC resistance, AC attenuation, cable length, and fault location. To address the trade-off between efficiency and accuracy in frequency sweep methods, an intelligent resonance point detection algorithm and an adaptive variable-step sweep strategy are proposed. Experimental results demonstrate that within the 10 m–50 m range, the system achieves a length measurement error of less than 1%, a DC resistance measurement error of less than 1%, an attenuation measurement error of approximately 5%, and 100% accuracy in wire sequence and short-circuit judgment. The instrument exhibits excellent engineering practicality and reliability, providing an efficient and accurate solution for field cable testing.

Key words: Ethernet twisted-pair cable; sweep frequency method; resonance points detection; adaptive step; relay routing
EEACC: 7210 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.03.031

基于扫频法与智能检测的以太网双绞线测试仪设计与实现*

宋若辰, 徐沣瑾, 许鑫玉, 杨 阔*
(东南大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 211189)

摘 要: 设计并实现了一种基于 STM32 的集成化以太网双绞线测试仪。系统硬件采用“核心控制器+多功能继电器路由”架构, 实现了直流电阻、交流衰减、线缆长度及故障定位的一体化测量。针对扫频法效率与精度矛盾, 提出了谐振点智能检测算法与自适应变步进扫频策略。实验结果表明, 系统在 10 m~50 m 范围内, 长度测量最大误差<1%, 电阻测量误差<1%, 衰减测量误差<5%, 线序及短路判断准确率达到 100%。仪器具备良好的工程实用性和可靠性, 为现场线缆测试提供了高效、准确的解决方案。

关键词: 以太网双绞线; 扫频法; 谐振点检测; 自适应步进; 继电器路由
中图分类号: TM934 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)03-0692-06

以太网双绞线作为现代有线网络通信中最基础的物理媒介, 其电气性能的优劣关系到网络传输的稳定性、速率与可靠性。随着网络基础设施规模的持续扩大与智能化程度的不断提升, 对线缆的快速、准确测试提出了更高要求。

目前, 针对以太网双绞线的测试技术主要包括基于时域反射(Time Domain Reflectometry, TDR)[1-3]的故障定位、基于电阻测量的长度推定以及基于频域分析的性能评估等。然而, 这些方法往往各自独立, 缺乏系统集成, 且在测量精度、抗干扰能力及适应性方面存在局限。例如, TDR 法对硬件脉冲源要求极高, 成本昂贵; 电阻法[4]受环境温漂与线缆老化影响显著, 误差较大; 而固定步进的扫频法则在宽频带测试中难以兼顾精度与效率。

近年来, 随着嵌入式处理性能的提升与智能检测算法[5-6]的发展, 融合多种测量原理于一体的便携式测试仪成为研究热点。其中, 基于扫频与传输线谐振原理的长度测量方法, 因具有非接触、精度高、抗干扰强等优势, 受到广泛关注。同时, 开尔文四线法[7-8]在小电阻测量中的高精度特性, 也为线缆直流电阻的准确测量提供了可靠途径。然而, 如何将这些方法有机整合, 仍是当前面临的工程挑战。

针对上述问题, 本文设计并实现了一种基于 STM32 的简易以太网双绞线综合测试仪。该仪器集成双端与单端检测功能, 可实现对线缆直流电阻、交流衰减、长度、线序、类型及短路状态的快速、准确测量, 并设定了如下关键技术指标: 在 10 m~50 m 范围内, 长度测量误差小于 1%; 直流电阻测量误差

项目来源: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2242024S10020); 东南大学电子科学与工程学院 2025 年教育教学改革专项经费项目(5206002501)
收稿日期: 2026-02-15 **修改日期**: 2026-03-09

小于 1%;衰减测量误差小于 5%;线序及短路判断准确率达 100%。在实现上,系统通过多功能继电器路由架构实现恒流源、DDS 扫频信号与数字电平的智能切换;提出谐振点智能检测算法与自适应变步进扫频策略,显著提升长度测量精度与速度。最后,通过系统的实验对仪器的各项功能和指标进行了全面的测试与验证,结果表明本设计具有良好的工程实用性与可靠性。

1 系统总体设计

1.1 系统功能与技术指标

本文设计的以太网双绞线测试仪可以实现以下功能:双端/单端检测、电阻测量、长度测量、衰减测量、线序/类型/短路判断。关键技术指标设计为在 10 m~50 m 范围内,长度测量误差小于 1%;直流电阻在 0.1 Ω~20 Ω 测量误差小于 1%;衰减测量误差小于 5%;线序及短路判断准确率达 100%。

1.2 硬件总体架构

系统硬件架构以 STM32F407 微控制器为核心,如图 1 所示,主要包括三大功能模块:激励源模块、信号路由模块与信号采集模块。其中,激励源模块由高精度恒流源、DDS 扫频信号发生器和数字电平输出电路组成,分别用于直流电阻测量、交流扫频测量和线序检测。信号路由模块采用自主设计的 8+1 路继电器网络,实现三种激励源与八条被测线缆的智能切换与灵活路由,从而在单电源系统下集成双端与单端多种测量模式。信号采集模块则包括差分放大、程控滤波和 ADC 转换电路,完成对响应信号的调理与数字化。通过上述模块化设计,系统构建了一个统一、可重构的硬件平台。

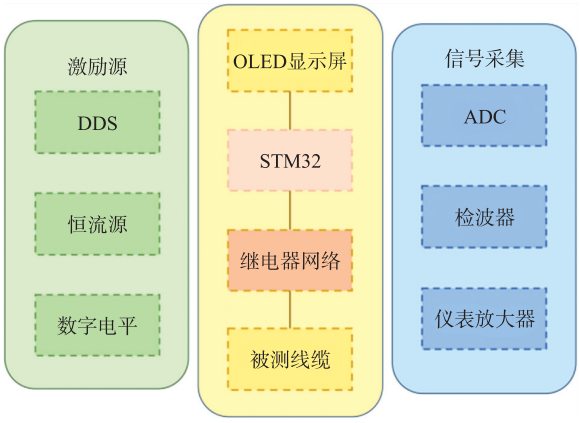


图 1 系统硬件架构

1.3 软件总体流程

软件总体流程基于分层状态机设计,实现测量任务的自动调度与执行。系统上电后完成硬件自检与初始化,随后进入主循环等待用户指令。根据检测模式选择,软件跳转至相应的测量状态。如图 2 所示,双端检测时,依次执行继电器路由配置、恒流源开尔文四线电阻测量、线序逻辑判断、固定频点衰减采样,数据经滤波后存入结果缓冲区。

单端检测时,启动自适应变步进扫频,调用谐振点智能检测算法实时分析返回信号,识别谐振频率并解算线缆长度与短路位置。

两种模式下,测量数据均通过校准系数修正后,在 OLED 屏幕实时显示,并支持串口输出以供上位机分析。整个流程由定时器中断驱动采样,确保实时性与同步性。

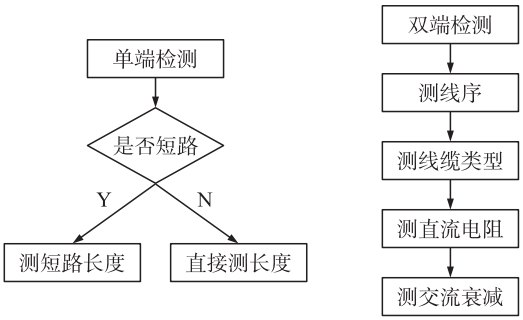


图 2 单端和双端检测流程

2 关键技术研究与算法设计

2.1 谐振点智能检测算法研究

在以太网双绞线扫频法测量中,谐振频率的准确检测是决定长度测量精度的关键。传统方法采用固定阈值法或全局最小值法,存在抗干扰能力弱、易受噪声影响等问题。本文提出一种基于滑动窗口优化的谐振点智能检测算法,通过移动平均滤波、动态阈值设置和边界保护机制的三重优化,显著提升了谐振点检测的准确性和鲁棒性。算法流程如图 3 所示。

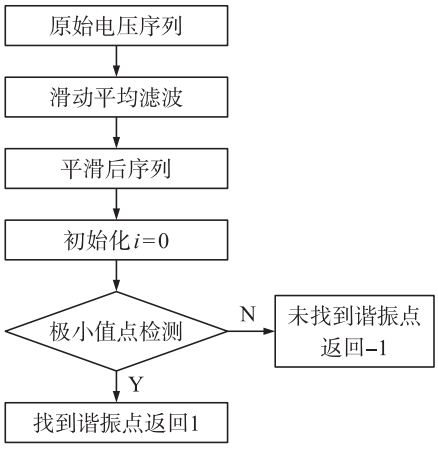


图 3 滑动窗口滤波流程

滑动窗口大小 W 的选择是滤波效果与计算效率的权衡[9-10]。对于离散序列 $x[n]$，窗口大小 W 的移动平均滤波可表示为：

$$y[n]=\frac{1}{W}\sum_{k=0}^{W-1}x[n-k] \tag{1}$$

3 dB 截止频率为：

$$f_c=\frac{0.443}{W\cdot T_s} \tag{2}$$

式中：T_s 为采样间隔。在本文系统中，$T_s=1$ ms，包含 DDS 稳定时间 900 μs 和 ADC 转换时间，为抑制频率高于 1 kHz 的噪声并保留谐振点特征，计算得：

$$W_{理论}=\frac{0.443}{f_c\cdot T_s}=15 \tag{3}$$

在理论分析的基础上，我们实验测量了不同窗口大小对于谐振点检测的影响，最终确定 $W=15$ 是最佳的窗口的大小。此时达到了最佳的准确率与计算时间平衡，过大的窗口会导致谐振点细节丢失，反而不利于检测。

动态阈值由固定阈值和局部极小值条件共同构成。前者基于 Neyman-Pearson 准则设定，确保检测概率>99%；后者通过比较相邻三点幅值识别候选谐振点。针对扫频起始的瞬态响应，算法设置三重边界保护：跳过前 20 个采样点、限制检测范围、自动调整窗口边界。经实测，在 0 dB 强噪声环境下，算法检测准确率仍保持在 95%以上。

与常见方法对比，本文算法在准确率与计算效率间取得最佳平衡，结果如表 1 所示。

表 1 不同谐振点检测算法性能对比

算法	检测准确率/%	计算时间/ms
简单阈值法	85.3±3.2	0.3
中值滤波法	97.8±1.1	2.8
本文算法	99.2±0.3	1.2
卡尔曼滤波	98.5±0.5	5.6

2.2 自适应变步进扫频策略

在以太网双绞线长度测量中，扫频法的精度与效率直接取决于扫频策略的设计。传统固定步进扫频方法在宽频带范围内难以兼顾测量精度与效率，低频段步进过大会导致谐振点漏检，高频段步进过小则会显著增加测量时间。本文提出一种基于资源约束的自适应变步进扫频策略，通过理论建模与工程优化，实现了扫频精度与效率的最优平衡。

当正弦信号通过长度为 L 的传输线时，输入阻抗呈现周期性变化。根据传输线理论[11]，得到基本谐振频率与长度的关系：

$$L=\frac{v}{4f_{\min}} \tag{4}$$

将频率扫描范围 $[f_{\min},f_{\max}]$ 划分为 M 个子区间，其中第 i 个区为 $[f_{i-1},f_i]$，区间内采用固定步进 $\Delta f_{\text{step},i}$，该区间内的扫描点数为 $N_i=\Delta f_i/\Delta f_{\text{step},i}$。优化目标是在满足测量精度要求的前提下最小化总扫描点数。精度约束要求每个子区间的步进不大于该区间内谐振峰宽度的 α 倍，即 $\Delta f_{\text{step},i}\leqslant\alpha\cdot W_{\text{res},i}$。其中 $W_{\text{res},i}$ 为第 i 个子区间内的谐振峰宽度估计值，α 为比例系数。通过拉格朗日乘子法求解该约束优化问题。构造拉格朗日函数求偏导后得到的最优解满足：

$$\Delta f_i\propto f_{i,\text{center}} \tag{5}$$

即最优步进与中心频率成正比。低频段需要小步进保证精度，高频段可采用大步进提高效率。我们实际采用的具体步进划分如图 4 所示，深色为我们采用的步进，灰色是固定步进的对照，折线是长度灵敏度。在 1 MHz~65 MHz 扫频范围内，低频区步进低至 20 kHz，高频区步进逐步提升至 500 kHz，在保证谐振点检测精度的同时显著减少扫描点数。

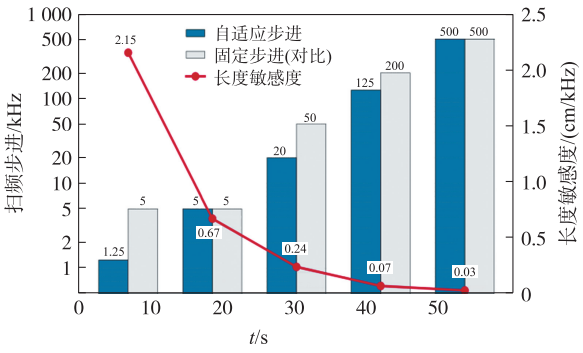


图 4 实际步进与长度灵敏度

在实际以太网线缆测试中，自适应变步进扫频策略表现出色，实现了 10 m~50 m 线缆长度全覆盖，平均相对误差为 0.23%，平均单次扫频 2.43 s，连续测量无异常。

2.3 NVP 现场校准技术

信号在介质中的传播速度与线缆长度及谐振频率的关系由公式 $L=v/(4f)$ 确定，其中 $v=c\times\text{NVP}$，c 为真空中的光速。若 NVP 存在误差，将直接导致长度测量出现比例偏差。在以太网双绞线长度测量中，信号传播速度的准确性直接决定了测量结果的可靠性。实际工程中，由于线缆材质、结构、绞合密度以及环境温度等因素的影响，标称传播速度(Nominal Velocity of Propagation，NVP)值与实际值往往存在偏差，这种偏差会导致系统性的测量误差[12]。传统测试仪器通常采用固定的 NVP 值，难

以适应不同线缆和变化的环境条件。本文创新性地提出了一种基于四分之一波长原理的 NVP 现场实时校准机制,允许用户通过已知长度的标准线缆对系统进行现场校准,从而显著提升了测量系统的适应性和整体精度。

本文设计的校准方法操作简便,用户只需将一段已知长度的标准线缆接入测试仪,通过上位机发送校准命令。系统将自动执行扫频测量,精确获得该线缆的谐振频率,并依据公式 $v_{cal}=4L_{std}f_{std}$ 计算出实际传播速度。随后,系统会更新内部校准系数 $k=v_{cal}/v_{nominal}$。校准时,用户可通过串口命令微调校准系数,调整步进为 0.01,实现了对 NVP 值的精细修正。

本校准机制的创新之处在于将传统依赖固定参数的测量模式转变为用户可参与的动态自适应模式。通过简洁的人机交互,现场工程师能够快速、准确地使测试仪适配当前使用的线缆,有效克服了由于线缆批次差异和环境变化带来的测量误差。

2.4 继电器路由架构设计

如 1.2 节所述,信号路由模块是实现多模式集成的关键。如何在有限的硬件资源下实现多种测量信号的灵活切换,是本系统设计的重要挑战。本节对继电器网络的具体设计进行详细阐述。以太网双绞线综合测试仪需支持三种测量模式,对应不同的信号源需求:①直流电阻测量:需要恒流源激励,测量电压降。②线缆长度/衰减测量:需要 850 kHz~65 MHz DDS 扫频信号。③线序/短路检测:需要单片机提供数字高电平信号。

如图 5 所示,八条线缆需独立控制,每条线缆连接不同信号源。传统方案需 24 个继电器(3×8),本文通过分层设计减少至 9 个继电器。1~7 号的 A 端接 DDS,B 端接恒流源,因为线序/短路检测只需要单路信号即可测得,故我们选择 8 号增加了第二层继电器,这样 8 号的 A 端就可以连接单片机获得数字高电平信号。

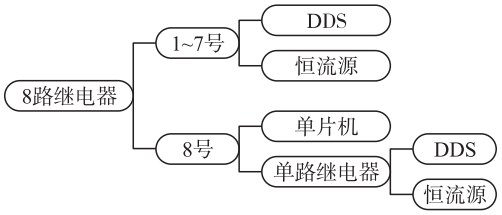


图 5 继电器网络设计

为减少继电器引入的串扰和衰减,采取了屏蔽设计、终端匹配、电源去耦。继电器信号线与电源线分层走线,数字与模拟信号隔离,DDS 输出端串联 50 Ω 电阻,线缆终端并联 50 Ω 到地,同时每个继电器电源引脚并联 100 nF 陶瓷电容和 10 μF 电解电容。继电器关断时的隔离度计算得 $20\lg\left(\frac{R_{off}}{R_{on}}\right)=180$ dB,实际测试隔离度>80 dB,满足测量要求。同时,为避免继电器抖动引入噪声,采取了软件消抖、硬件保护和状态监测。系统切换后延时 10 ms 再采样,同时继电器线圈反并联二极管,抑制反电动势。最后我们也通过 ADC 监测信号电平,异常时重试切换。

3 实验测试与结果

3.1 实验平台与测试环境

实验所使用的被测线缆样本涵盖超五类、六类、超六类屏蔽与非屏蔽双绞线,长度范围为 1 m~50 m。所有标准长度值采用高精度钢卷尺测量,标准电阻值由六位半数字万用表 SIGLENT SDM3065X 测得,标准衰减值由 200 MHz 信号发生器 SIGLENT SDG622X-E 配合 100 MHz 示波器 SIGLENT SDS 1102X 间接标定。

3.2 测量结果和精度分析

①线序与类型判断

将测试仪接入待测网线两端,运行双端检测程序。对 10 根不同线序(直连/交叉)和类型(UTP/SFTP)的网线进行测试,结果显示:所有线缆的线序关系、类型标识均正确显示,准确率达 100%。

②短路检测和定位

选取不同长度的 UTP 线缆,在距测试端特定位置人为制造短路故障,分别用本测试仪进行单端短路定位测量,每根线缆重复测量 3 次取平均值,结果如表 2 所示。表中所有测试点误差均小于 1%,验证了扫频法在短路定位中的有效性。

表 2 短路长度测量结果与分析

线缆类型	线缆总长/m	实际短路位置/m	实测位置/m	绝对误差/m	相对误差/%
超五类	10.0	3.5	3.52	0.02	0.57
超五类	10.0	7.8	7.85	0.05	0.64
六类	20.0	5.2	5.24	0.04	0.77
六类	20.0	15.3	15.41	0.11	0.72
六类	30.3	10.0	10.08	0.08	0.80
六类	30.3	22.5	22.62	0.12	0.53
超六类	41.0	18.2	18.31	0.11	0.60
超六类	41.0	33.7	33.92	0.22	0.65

③长度测量

选取 7 根长度在 10 m~50 m 范围内的不同类别网线,分别用本测试仪进行长度测量,每根线缆重复测量 5 次取平均值,结果如表 3 所示。在 10 m~

50 m 范围内,长度测量最大相对误差为 0.78%,平均相对误差约 0.28%,优于设计指标。误差主要来源于 NVP 标称值与实际值的微小偏差、谐振点检测的量化误差以及线缆本身长度的测量误差。

表 3 线缆长度测量结果与分析

类型	标准长度/m	实测长度/m	绝对误差/m	相对误差/%
超五类	10.0	10.02	0.02	0.20
超五类	20.7	20.76	0.06	0.29
六类	30.3	30.37	0.07	0.23
六类	41.0	40.90	-0.10	0.24
六类	51.7	51.73	0.03	0.05
超六类	9.3	9.32	0.02	0.21
超六类	19.3	19.45	0.15	0.78

④直流电阻测量

采用开尔文四线法对 1 m~50 m 范围内的线缆进行直流电阻测量,与六位半万用表测量值对比,结果如表 4 所示。除 1 m 短线的相对误差为 3.02%外,其余线缆误差均在 1%以内。1 m 线误差偏大的原因在于被测电阻极小,约 0.35 Ω,接触电阻和导线电阻的影响相对显著,且放大器输出接近 ADC 量程下限。

表 4 直流电阻测量结果与分析

长度/m	标准电阻/Ω	实测电阻/Ω	绝对误差/Ω	相对误差/%
1	0.350 7	0.340 1	-0.010 6	3.02
2	0.661 9	0.658 3	-0.003 6	0.54
10	1.420 3	1.432 8	0.012 5	0.73
20	2.854 1	2.866 6	0.012 5	0.44
30	2.395 2	2.375 4	-0.019 8	0.83
40	3.144 4	3.165 9	0.021 5	0.68
50	3.895 9	3.903 2	0.007 3	0.19

3.3 误差分析与未来展望

尽管本测试仪在 10 m~50 m 范围内实现了长度测量误差小于 1%、线缆长度大于 1 m 时直流电阻误差小于 1%等指标,但实测数据仍揭示出若干系统性误差来源。首先,长度测量基于 NVP 值换算,而不同批次线缆的 NVP 存在固有差异,现场校准虽能修正比例偏差,但校准用标准线缆的长度误差及用户操作偏差仍会引入残余比例误差,例如表 3 中最大相对误差 0.78%即可能与此相关。其次,谐振频率识别受扫频步进限制,尽管智能检测算法准确率达 99.2%,但步进量化效应使谐振点定位存在正负半个步进的频率偏差,在低频段、步进 20 kHz 时对应长度误差约 0.1 m,与实测 0.02 m~0.15 m 的绝对误差吻合。第三,直流电阻测量中,1 m 短线电阻仅 0.35 Ω,接触电阻及 ADC 量化噪声的相对贡献显著放大,导致 3.02%的偏差;而较长线缆电阻增大后该影响减弱,误差普遍低于 1%。上述误差因素相互耦合,后续可通过优化扫频策略、增强屏蔽等进一步抑制。

本文设计并实现了一种基于 STM32 的集成化以太网双绞线测试仪,有效解决了现场环境下对网线电气性能进行快速、全面评估的工程需求。实验结果表明系统整体性能满足设计指标,具备良好的工程实用性与可靠性。本研究的主要贡献在于将多种测量原理与嵌入式系统深度融合,通过硬件重构与算法优化,在成本与资源受限条件下实现了专业级测试功能,为网络工程现场施工、运维检修及教学培训提供了一款实用、便捷的便携式工具。未来工作可进一步拓展系统测量范围,集成更复杂的频域分析与故障诊断算法,并探索基于无线传输的远程数据管理与分析功能,以增强其智能化与网络化应用潜力。

参考文献:

[1] 王丹阳,唐健钧,陈讴,等. 基于时域反射法的航空电缆故障定位技术研究[J]. 航空制造技术,2019,62(23):84-8,96.

[2] 李伟明,郭孟飞,李龙,等. 基于时域反射技术的电子产品开路失效分析[J]. 印制电路信息,2025,33(11):34-38.

[3] 莫泰贵. 基于时域反射技术的通信网络电缆故障分析[J]. 机电信息,2025(9):6-9.

[4] 吴晶晶,解文彬,逯燕玲. 温度对五类非屏蔽双绞线的影响[J]. 国外电子测量技术,2006,25(9):41-44.

[5] 杨秋燕,郝新红,乔彩霞,等. 基于恒虚警率检测的线性调频引信抗扫频式干扰方法[J]. 北京航空航天大学学报,2025,51(12):4258-4267.

[6] 杨秋燕,陈齐乐,郝新红. 连续波调频引信分数域匹配阶抗扫频干扰方法[J]. 兵工学报,2025,46(1):158-166.

[7] 段雯. 一种微小电阻测试系统的设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2023(1):26-30.

[8] 郝志强. 开尔文四线检测电阻方法介绍[J]. 铁道通信信号,2015,51(z1):118-119.

[9] 宋佳儒,胡士强,杨永胜. 基于滑动窗口滤波器的无误差累积位姿估计[J]. 计算机仿真,2019,36(4):209-213,228.

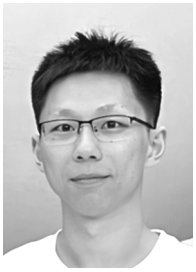
[10] Yang J L,Luo Y J,Bai Y H,et al. Finite Sliding Window Maximum Correntropy Criterion Conjugate Gradient Adaptive Filtering Algorithm[J]. Digital Signal Processing,2026,169:105697.

[11] 刘康,腾清松,董武,等. 基于传输线理论的低压电力

线载波通信信道建模研究[J]. 电工技术,2025(21):150-154.

[12] 罗刚. 影响长度测量准确度的主要因素[J]. 计量与测试技术,2008,35(5):16,19.

宋若辰(2005—),女,东南大学电子科学与技术专业,本科生;



杨　闯(1994—),男,博士,讲师,主要研究方向为物理电子学、光学,k_yang@seu.edu.cn。