

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407421

基于云的矢量网络分析仪在线系统软件设计*

沈嘉诚^{1,2} 裘国华^{1,2} 袁勤文^{1,2}

(1. 中国计量大学信息工程学院 杭州 310018; 2. 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室 杭州 310018)

摘要: 矢量网络分析仪是射频与微波检测领域中不可或缺的现代电子测量设备。传统的矢量网络分析仪检测方法主要依靠工作人员驻守在仪器旁操作控制,这种方法效率低且灵活性不强,无法满足现代电子测量所需要的智能化与便捷性需求。针对传统矢量网络分析仪检测中的难题,设计了一种基于云服务器的矢量网络分析仪在线软件系统。系统通过 SCPI 协议实现矢量网络分析仪与本地电脑进行连接,本地电脑通过 SSH 协议上传矢量网络分析仪检测到的 S 参数以频率点、实部与虚部的数据格式至云服务器的 MySQL 数据库中,使用 Django 开发的网站可以使用户通过任意设备登陆网站实时获取 S 参数的可视化数据,包括频域、时域和驻波比等相关波形图。将系统应用于矢量网络分析仪 E5071C 对矩形不锈钢管 10~12 GHz 的双端口 S 参数检测中进行试验,结果表明检测数据在仪器与本地电脑短时间内多次传输中无数据损失,相关 S 参数数据与仪器检测结果的误差小于 0.01%,用户可通过多个设备同时访问网站获取实时 S 参数波形图,证明了该系统的实用性,为矢量网络分析仪的检测提供了新的可靠方案。

关键词: 矢量网络分析仪; 在线检测系统; SCPI 协议; 云服务器

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design of cloud-based vector network analyzer online system software

Shen Jiacheng^{1,2} Qiu Guohua^{1,2} Yuan Qinwen^{1,2}

(1. School of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The vector network analyzer is an essential instrument in RF and microwave testing. The traditional methods of detection necessitate the presence of on-site personnel for operation and control, which is inefficient and inflexible, failing to meet the contemporary requirements for intelligent and convenient electronic measurement. To address these challenges, an online software system based on a cloud server was designed for vector network analyzer. The system connects the vector network analyzer to a local computer via the SCPI protocol. The local computer uploads the S-parameters, comprising frequency points, real and imaginary components, to the cloud server's MySQL database via SSH. The Django-developed website allows users to access real-time visual data of S-parameters, including frequency domain, time domain, and standing wave ratio graphs, from any device. The system was tested on the E5071C vector network analyzer for dual-port S-parameter detection of rectangular stainless steel tubes from 10~12 GHz. Results showed no data loss during multiple transmissions between the instrument and the local computer. The error between S-parameter data and the instrument's detection results was less than 0.01%. Users could access real-time S-parameter waveforms simultaneously from multiple devices, proving the system's practicality and providing a reliable solution for vector network analyzer detection.

Keywords: vector network analyzer; online detection system; SCPI protocol; cloud server

0 引言

随着射频、微波测量技术的飞速发展,可准确获取微波网络特性的矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)已经成为计量领域中不可或缺的现代电子测量设备^[1]。它专门用于测量与微波网络和组件相关的参数^[2]。近年来,无线通信技术的飞速进步不仅改变了通信行业的面貌,同时也推动了电子测量设备的智能化和使用便捷性的提升^[3]。强化的交互功能使研究人员能够通过远程操作仪器进行实验,从而支持在线实验的顺利进行^[4-7]。在线实验系统领域内,矢量网络分析仪矢量参数的传输、通信以及数据联网可视化显得尤为重要,为科学研究和实际应用提供了丰富的数据资源。

随着仪器自动化与智能化技术获得快速发展,许多学者对矢量网络分析仪的检测方法进行了一定的优化改造。文献[8]与文献[9]基于 Python 和 C++ 语言设计了一款 VNA 射频测量自动化系统,工作效率较手动测量有了显著提升,而文献[10]与文献[11]则提出了一种基于 LabVIEW 平台设计的 VNA 控制系统,减少了随机误差节约测试时间。然而,这些研究中使用的 USB/GPIB 总线连接电脑与 VNA 的方式成本较高,且传输速率有限。此外,基于 LabVIEW 平台的系统存在代码维护难度高、执行效率低的问题。以上研究的集中点都在减少 VNA 测试的时间,但测试中仍需要工作人员在仪器旁进行有线操作,仍将仪器测试限定在仪器与仪器间,灵活性有限。

为进一步提升 VNA 检测的智能性和便捷性,本研究基于 Python 语言开发了一种新型的 VNA 系统,充分利用云服务器的功能,并采用可编程仪器标准命令(standard commands for programmable instruments, SCPI)协议通过 LAN 连接 VNA 与本地电脑。这一创新设计旨在实现对矢量网络分析仪测量结果的无线通信,并进一步实现数据的精准分析和可视化。云计算技术与 SCPI 协议的有机整合具有重要潜力,为物联网领域提供了灵活、可扩展和经济有效的解决方案。通过借助云计算,可以实现对 VNA 系统的远程管理和监控,从而提高实验的灵活性和效率。此外,基于 Python 设计的 Web 系统便于后期升级和新增相关功能,SCPI 协议的应用使得矢量网络分析仪能够更加智能地与其他设备进行通信,实现更加复杂和高效的测量任务。

1 数据的处理与传输原理

1.1 基于 SCPI 协议的数据传输

SCPI 通信协议是一种用于远程控制和测量仪器与设备之间通信的标准化协议。它定义了一组文本命令和

语法,允许用户通过计算机或控制系统发送命令来控制仪器的操作^[12]。SCPI 协议提供了一种统一的方法,用于控制来自不同制造商和类型的仪器,实现设备的自动控制和数据采集,用户可以轻松配置参数、检索测量结果并执行各种仪器操作,从而提高测试效率和一致性。

SCPI 命令以美国信息交换标准代码(American standard code for information interchange, ASCII)的方式进行通信,可作用于任何一个可编程测量仪器,并且同一类的命令属于同一个子系统中,与编程环境、编程语言无关,便于 SCPI 模块的移植。一条完整的 SCPI 命令是由树型分层结构来描述的,多个助记符构成一个命令,助记符与助记符之间存在着一定的逻辑关系,中间采用冒号进行隔开^[13]。表 1 显示了几个在本系统中主要用到的命令与其含义。

表 1 一些 SCPI 命令及其含义

Table 1 Some SCPI commands and their meaning

SCPI 命令	含义
* IDN?	读取仪器识别代码
SENSe:FREQuency:CENTer {center_frequency}	设置中心频率
SENSe:FREQuency:SPAN {frequency_span}	设置频率带宽
SENSe:SWEEP:POINts {frequency_points}	设置采样点
CALC1:PAR1:DEF S11	测量 S ₁₁ 数据
CALC1:DATA:SDATa?	获得当前的 S 参数(以实部虚部为一组)

设计系统中使用的 SCPI 协议确保了与各种现有测试设备和软件工具的兼容性,简化了整个测试过程。

1.2 S 参数的分析处理

矢量网络分析仪通常用来测量被测网络的 S 参数的幅频特性和相频特性等。任何线性网络都可以用多个 S 参数表征其端口特性,对 N 端口网络需要 N² 个 S 参数。目前矢量网络分析仪的研究中主要以单端口与二端口网络为主。以二端口网络为例,假设一个二端口网络的示意图如图 1 所示。



图 1 二端口网络示意图

Fig. 1 Two-port network diagram

在图 1 可以看到有两个输入信号 a_1 和 a_2 。当 a_1 输入到二端口网络时由于输入端口的阻抗不匹配产生了反射输出 b_1 , 当 a_2 输入到被测网络时由于输入端口阻抗不

匹配产生了反射输出 b_2 。此时设端口的入射电压为 V_n ，电流为 I_n ，传输线的特征阻抗为 Z_0 。则 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 可以由下述式(1)~(4)表达：

$$a_1 = \frac{V_1^+}{\sqrt{Z_0}} \tag{1}$$

$$b_1 = \frac{V_1^-}{\sqrt{Z_0}} \tag{2}$$

$$a_2 = \frac{V_2^+}{\sqrt{Z_0}} \tag{3}$$

$$b_2 = \frac{V_2^-}{\sqrt{Z_0}} \tag{4}$$

因此定义双端口的 S 参数矩阵为：

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

因此可以求出 S 参数的计算公式为：

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \tag{6}$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \tag{7}$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \tag{8}$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \tag{9}$$

通过 S 参数可以计算被测网络的其他电路参数和指标，如传输参数、反射参数、驻波比、增益等。本设计主要的参数指标有：反射系数、回波损耗、衰减、驻波比、相位与 Smith 圆图。

反射系数表示信号从一个网络或元件反射回来的程度，一般为被测器件的反射电压与入射电压之比，通常用 S 参数中的 S_{11} 表示^[14]。以二端口为例，数学表达式为：

$$\begin{cases} X(k) = DFT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W^{nk} \\ x(n) = IDFT[X(k)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W^{-nk} \end{cases} \quad (0 \leq n \leq N-1, W = e^{-j\frac{2\pi}{N}}) \tag{14}$$

其中， n 代表离散的时间增量， k 与频率相似，单位为采样点数/周期。需要注意的是，离散傅里叶变换在时域和频域上都呈现离散的形式且变换两端的序列都是离散周期信号的主值序列。

普通矢量网络分析仪本身没有时域分析功能，但可以通过外部设备或特定的技术来实现时域分析。VNA 先在一段带宽内用步进频率进行扫描，把反射系数作为频率的函数进行测量，得到 S_{11} 的频谱 $F(\omega)$ ，再通过逆傅里叶变换 (IFT) 等方法将频域数据转换为时域数据 $f(t)$ ，其中逆傅里叶变换的数学公式为：

$$\Gamma_1 = S_{11} \tag{10}$$

$$\Gamma_o = S_{22} \tag{11}$$

其中， Γ_1 表示为从端口 1 反射回来的反射系数，用来描述信号从端口 1 返回网络的程度， Γ_o 表示为特定情况下的参考平面的反射系数，式中 Γ_o 对应于 S 参数中的 S_{22} ，表示从端口 2 反射回来的反射系数。

回波损耗表示信号从网络中反射回来时失去的功率，一般为被测器件的反射功率与入射功率之比，单位为 dB，以单端口为例，数学表达式为：

$$RL_1 = 20 \lg \frac{1}{|S_{11}|} \tag{12}$$

式中： RL_1 表示为端口 1 的回波损耗。

衰减表示信号穿过网络或元件时的损耗程度，一般为被测器件输出端信号功率与输入端信号功率之比，单位为 dB。该概念存在于多端口网络中，其中以二端口网络为例，衰减通常用 S 参数中的 S_{21} 表示，数学表达式为：

$$L_f = 20 \lg \frac{1}{|S_{21}|} \tag{13}$$

式中： L_f 表示为从端口 1 输入，端口 2 输出的衰减。

时域：时域是描述信号在时间轴上的变化的领域，通过分析信号在时间上的变化，能揭示电路元件的时序行为，对于理解脉冲响应、信号传播延迟和频率变化等关键参数至关重要。

在 VNA 中，时域分析用于研究信号在电路中的传播、反射和延迟特性^[15]。测量值的幅度和相位都记录在离散的频率轴上，由于频率轴的离散性及限于频率范围，因此不可能进行连续傅里叶变换与逆变换，因此需要使用离散傅里叶变换^[16]。假设有有限长序列 $x(n)$ 的长度为 N (范围为 $0 \leq n \leq N-1$)，它的离散傅里叶变换 $X(k)$ 也是一个长度为 N 的频域序列 (范围为 $0 \leq n \leq N-1$)，则离散傅里叶变换对为：

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega \tag{15}$$

式中： e 为自然常数， i 为虚数单位。

驻波比 (standing wave ratio, SWR) 是用于描述电传输线或天线系统中波的反射程度的无量纲指标。SWR 是 VNA 中一个常用的性能参数，它指示了信号在传输线或天线系统中的驻波情况。SWR 的定义是驻波的最大振幅与最小振幅之比。对于反射系数 Γ 与 SWR 之间的数学表达式为：

$$SWR = \frac{1 + | \Gamma |}{1 - | \Gamma |} \quad (16)$$

其中, $| \Gamma |$ 是反射系数的幅度。当 $\Gamma = 0$ 时, $SWR = 1$, 表示传输线处于匹配状态, 没有反射波分量, 这时沿着传输线上各点的电压和电流的有效值都相等; 当 $| \Gamma | = 1$ 时, $SWR = \infty$, 表示传输线处于全反射状态。

相位: 相位描述信号波形的相对偏移, 是评估信号传输中相位关系的关键参数, 可以研究信号传输延迟、滤波器特性等方面。相位信息可以直接从 S 参数中获取, 通常以角度形式表示。相位 ϕ 的数学公式为:

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_s}{R_s}\right) \quad (17)$$

式中: X_s 和 R_s 分别是 S 参数中的虚部和实部。

Smith 圆图是一种用于阻抗匹配分析的图表, 通常用于微波工程中。它提供了一种直观的方式来表示复阻抗, 并且便于进行阻抗匹配设计^[17]。其原理是将归一化的终端阻抗的复数值映射到一个圆形的图表上。数学公式通常不直接涉及到 Smith 圆图, 而是通过复阻抗的表示, 例如 $Z = R + jX$, 其中 R 是电阻, X 是电抗。电压反射系数 Γ 和归一化复阻抗 Z 之间存在关系:

$$Z = R + jX = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = \frac{(1 + \Gamma_r) + j\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r) - j\Gamma_i} \quad (18)$$

利用两个复数相等必须满足它们的实部和虚部也相等的条件, 对式(18)进行拆分, 再整理后得到两个圆族:

$$\begin{cases} (\Gamma_r - \frac{R}{R+1})^2 + \Gamma_i = (\frac{1}{R+1})^2 \\ (\Gamma_r - 1)^2 + (\Gamma_i - \frac{1}{X})^2 = (\frac{1}{X})^2 \end{cases} \quad (19)$$

这两个圆族分别称为电阻圆以及等电抗圆, 将这两个圆族组合在一起, 就得到了 Smith 阻抗圆图的基本结构, 图 2 是 Smith 圆图的示例。

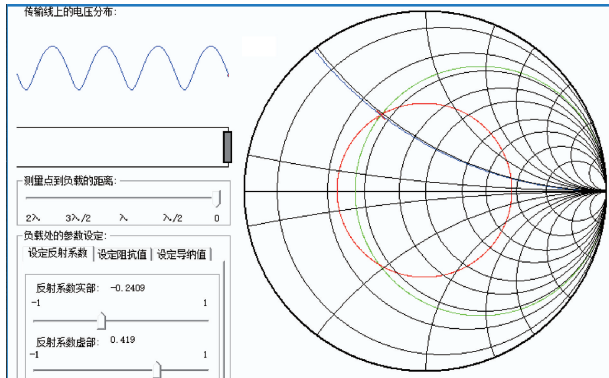


图 2 Smith 圆图

Fig. 2 Smith Chart

1.3 云服务器的数据上传与储存

云服务器建立在云计算基础设施之上, 利用虚拟化

技术将物理服务器划分为多个虚拟服务器实例。这些虚拟服务器实例可以弹性地分配和释放计算资源, 使其适应不同的工作负载需求^[18]。基于云的矢量网络分析仪在线系统是基于阿里云服务器平台以及 Ubuntu 系统搭建设计。该系统中数据传输协议是 SSH 协议, 数据保存方案是 MySQL 数据库。

SSH (secure shell) 是一种用于在网络中安全地进行远程登陆和执行命令的协议, 它通过加密通信的方式, 保护了数据在传输过程中的机密性, 在本设计中实现了两本地与云服务器之间的安全登录以及矢量网络分析仪的数据传送^[19]。

SSH 保证数据安全的原理是非对称加密。它相对于传统对称加密而言, 它包含两套公钥以及私钥, 其中公钥用来加密, 私钥用来解密, 并且无法通过公钥计算得到私钥, 因此只需要谨慎保管私钥在服务端, 而公钥可以随便传递^[20]。在此次系统设计中用户本地电脑与服务器段各自生成一套私钥和公钥, 并且互相交换公钥, 这样每一条发出的数据都可以用对方的公钥来加密, 对方收到后再用自己的私钥来解密, SSH 原理如图 3 所示。

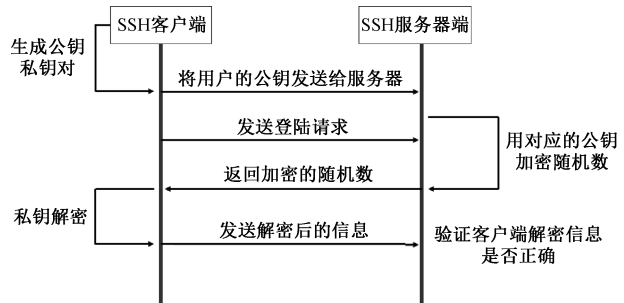


图 3 SSH 原理图

Fig. 3 SSH schematic diagram

MySQL 是一种相对比较标准的数据库服务器。一般情况下, 大多数网站的编程者尤其是动态网页的设计者往往都会使用这种语言来完成表格的创建工作或数据定义工作^[21]。MySQL 不仅提供高效的数据操作, 还注重数据的安全性, 通过建立与 MySQL 服务器的加密连接, 系统确保在数据传输过程中的机密性。此外, MySQL 的权限控制机制允许系统管理员为不同用户分配精确的数据库权限, 从而限制对数据的访问和操作^[22]。MySQL 目前是最为标准 and 常见的数据库语言之一。

2 矢量网络分析仪在线系统设计

2.1 云服务器的数据上传与储存

图 4 是基于云的矢量网络分析仪在线系统的总体架构, 主要包括本地系统跟在线系统。在本地系统中, 用户本地电脑与矢量网络分析仪通过 LAN 口连接, 使用 SCPI

协议进行数据交互,用户可以通过相关命令操控矢量网络分析仪得到需要的 S 参数。再将得到的相关数据通过 SSH 远程传输给云服务器并保存,云服务器会将所得到的数据进行分析处理,在动态网页中以数据可视化的方式展示矢量网络分析仪的数据。

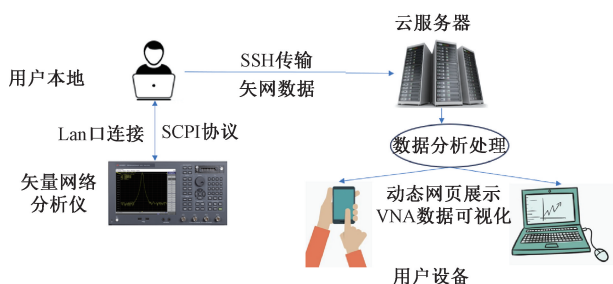


图 4 系统总体框架图

Fig. 4 Overall system framework diagram

2.2 本地系统设计

在基于云的矢量网络分析仪在线系统中,本地系统结构主要由用户本地电脑与矢量网络分析仪构成。在本设计中,用户本地电脑基于 Python 语言,通过 LAN 口与 TCP 通信协议,访问矢量网络分析仪 E5071C 的 IP 地址与相应端口,建立电脑与仪器之间的通信连接。在通信过程中,使用 Python 中封装的 PyVISA 库与矢量网络分析仪进行数据交互,本设计本地系统交互中的通信协议为 SCPI 协议,所获得的矢量网络分析仪数据将以 S 参数的频段、实部与虚部暂存于本地电脑。

2.3 在线系统设计

在线系统结构主要有两个部分,本地电脑将 S 参数数据以 JSON 数据格式上传保存至云服务器与云服务器进行数据处理生成数据可视化网站供用户使用。在本设计中使用的是阿里云服务器,本地电脑通过 SSH 协议将本地电脑暂存的 S 参数数据以频段、实部与虚部的方式每隔相应的时间上传至云服务器中的 MySQL 数据库,这样确保了用户访问的始终是矢量网络分析仪最新接收到的数据。

数据可视化网站系统使用了 Python 的 Web 开发框架 Django,前端页面采用 Bootstrap 框架,数据来源是云服务器中的 MySQL 数据库。本设计先在本地测试环境成功后,再将 Web 程序上传至阿里云服务器中。S 参数的处理分析在后端,服务器会根据上传的数据进行处理,得到每一个 S 参数的数据类型坐标轴数据保存在网页中。用户可以通过登录服务器域名,轻松的获取最新矢量网络分析仪的 S 参数的频域图、时域图、驻波比图、相位图与 Smith 圆图。图 5 是用户使用在线系统流程。

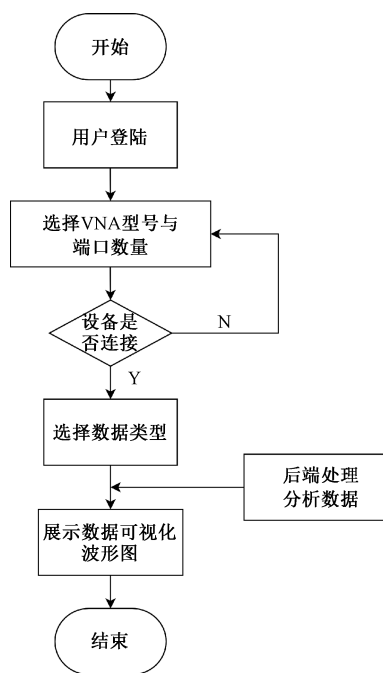


图 5 在线系统使用流程

Fig. 5 Online system usage process

3 系统试验方案与结果

在完成上述系统设计后,下文将对所设计的基于云的矢量网络分析仪在线系统软件进行试验测试。系统试验方案包括以下几点:本地电脑与矢量网络分析仪的连接与数据交互、数据上云保存与处理分析、用户通过手机端或电脑端登录可视化数据网站。该系统试验设计中的重点和难点包括以下几点:数据传输的准确性和稳定性、数据可视化的准确性与系统的兼容性和可拓展性。系统试验方案结束后还会与原 E5071C 自带的网页系统进行比较,以体现本系统设计的优越性。

下文将对矩形不锈钢管进行双端口 S 参数检测,检测的频段为 10~12 GHz,采样点设置为 201 个,输出功率为 0 dBm。检测仪器为是德科技矢量网络分析仪 E5071C。

首先将本地电脑与矢量网络分析仪 E5071C 通过 LAN 口进行连接,通过矢量网络分析仪系统自带的功能,设置 E5071C 的 IP 地址为 192.168.100.80,随后在电脑中 Python 编译软件 Pycharm 进行 PyVISA 库的调用与 E5071C 连接,相关流程与结果如图 6 所示,结果显示电脑已经读取到仪器识别码。

同时通过 SSH 连接远程云服务器与连接远程 MySQL 数据。连接云服务器代码及相关代码说明如表 2 所示。

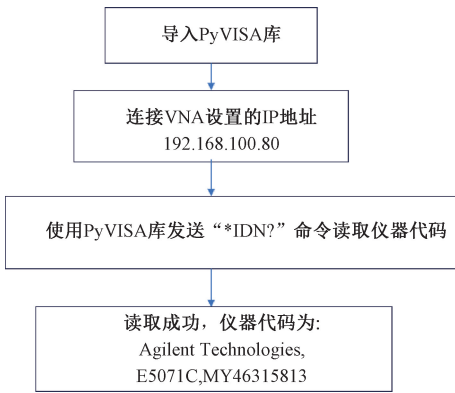


图 6 电脑与仪器间连接通信

Fig. 6 Connection and communication between computer and instrument

表 2 SSH 远程连接代码及其说明

Table 2 SSH remote connection code and its explanation

代码	说明
ssh = paramiko. SSHClient()	
ssh.set_missing_host_key_policy(paramiko. AutoAddPolicy())	使用 paramiko 库创建 SSH 客户端
ssh.connect(server_ip, username=server_username, password=password)	通过服务器 IP、用户名和密码进行连接

随后通过 PyVISA 库给 E5071C 发送 SCPI 命令,以频率、实部与虚部的方式依次得到当前 S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} 数据。表 3 为得到 S_{11} 数据的 SCPI 命令代码及相关代码说明。

表 3 获取 S_{11} 数据的 SCPI 命令代码

Table 3 SCPI command code for obtaining S_{11} data

代码	说明
vna.write('CALC1:PAR1:DEF S11')	控制 VNA 测量 S_{11} 参数
S11_r=vna.query_ascii_values('CALC1:DATA:SDATA?')[1;:2]	获取 S_{11} 的实部
S11_i=vna.query_ascii_values('CALC1:DATA:SDATA?')[1;:2]	获取 S_{11} 的虚部
S11_freq=vna.query_ascii_values('CALC1:SEL:DATA:XAX;')	获取 S_{11} 的频率点

考虑到 SCPI 命令传输的数据可能与原始矢量网络分析仪采集到的 S 参数存在偏差,同时在短时间内多次传输数据至用户本地时可能导致系统运行错误,需要对系统中的该部分进行多次验证。验证中,10 s 内运行了 10 次代码,每次将矢量网络分析仪当前采集到的 S 参数(以频率、实部与虚部的方式)保存在矢量网络分析仪本地。通过对这 10 组数据进行逐一比较,发现每组数据一致,证明传输过程中没有出现数据偏差,且没有出现相关

报错。

得到数据后,将相关数据以 JSON 格式上传至云服务器 MySQL 数据库中保存。JSON 数据内有 8 组数据,分别是数据来源、IP 地址、端口数量、S 参数与数据提交时间。表 4 介绍了云服务器 MySQL 数据库中保存 S 参数中每一组数据的名称以及相关说明。

表 4 S 参数保存格式名称与说明

Table 4 Format name and description for saving S parameters

保存格式名称	说明
Type	VNA 的型号
IPaddress	VNA 的 IP 地址
Port	单端口/双端口
S11_data	S_{11} 数据,以频率点、实部与虚部储存
S12_data	S_{12} 数据,以频率点、实部与虚部储存
S21_data	S_{21} 数据,以频率点、实部与虚部储存
S22_data	S_{22} 数据,以频率点、实部与虚部储存
Submit_time	收到 S 参数数据时间

访问云服务器域名,进入登陆系统页面,通过提前在系统中录入的账号密码登录在线系统网站。选择连接 E5071C,并设置为双端口和频域显示模式,即可获得当前频域图。图 7 展示了当前网站一部分 S 参数幅度图的数据可视化界面。在本部分测试中,手机、平板和电脑均可同时正常访问系统,相应界面无失真或混乱的情况。

将当前网页前端的频域图数据导出。同时,将此时的矢量网络分析仪 E5071C 的双端口 S 参数以频率、幅度(以 dB 为单位)的数据形式通过 SCPI 命令 CALC:DATA? FDATA 上传至用户本地电脑,以该数据生成的 S 参数幅度波形图与上文网页前端的 S 参数幅度波形图进行比较。图 8 为两个波形图对比,结果显示两组幅度波形图基本吻合。

由于两组 S 参数数据的实部与虚部无差异,为证明设计的主要 S 参数理论无误,因此,分别取 201 组 S 参数中 S_{11} 幅度偏差最大的一组 S 参数,定位其采样点,分别在本系统与 E5071C 仪器中取它的幅度、驻波比与相位 3 组主要 S 参数数据,比较其差异,结果如表 5 所示。幅度的单位为 dB,驻波比是比值所以没有单位,相位的单位是度($^{\circ}$),结果均精确至 4 位小数。

表 5 3 组主要 S 参数对比

Table 5 Comparison of three main S-parameters

参数类型	幅度	驻波比	相位
本系统分析处理数据	-41.158 9	1.017 7	-147.622 1
E5071C 的检测数据	-41.158 8	1.017 7	-147.622 2

结果显示,两组数据的误差小于 0.01%。由此可见,理论设计中的 S 参数分析和处理方法是准确无误的。

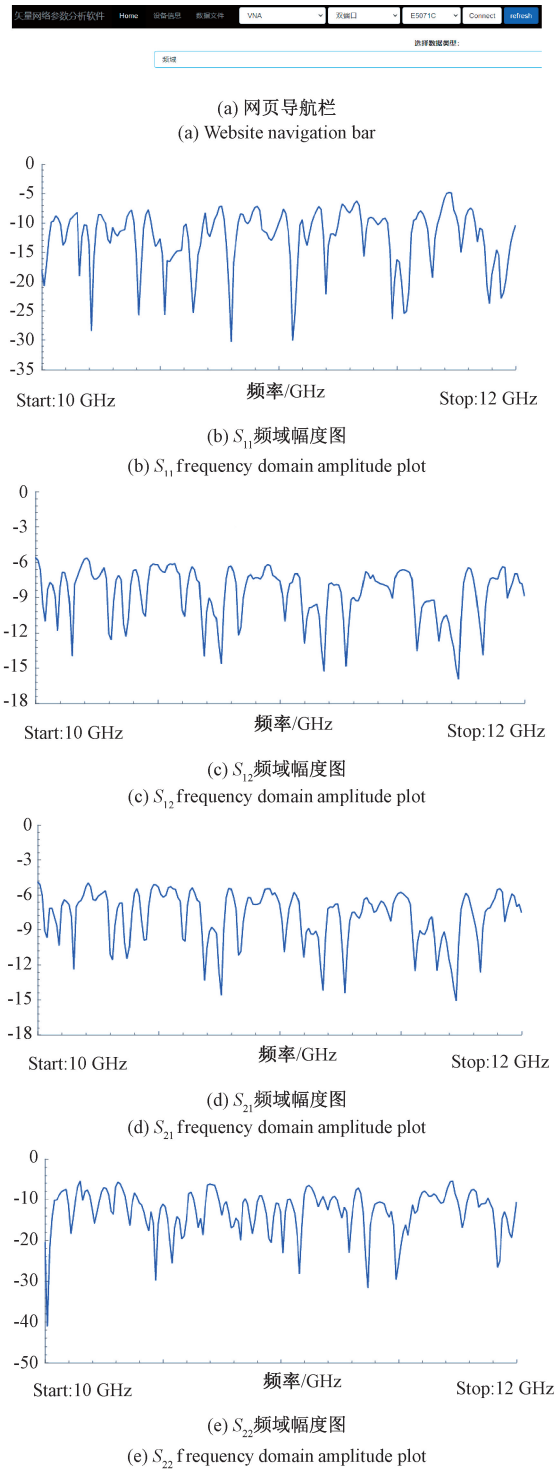


图 7 网站 S 参数幅度图数据可视化界面
Fig. 7 Website S-parameter magnitude graph data visualization interface

试验中可以通过直接访问给矢网 E5071C 设置的 IP 地址 192.168.100.80, 可以直接登陆是德科技矢网系统自配的网页, 如图 9 所示。

比较是德科技自带矢网系统与设计的基于云的矢量

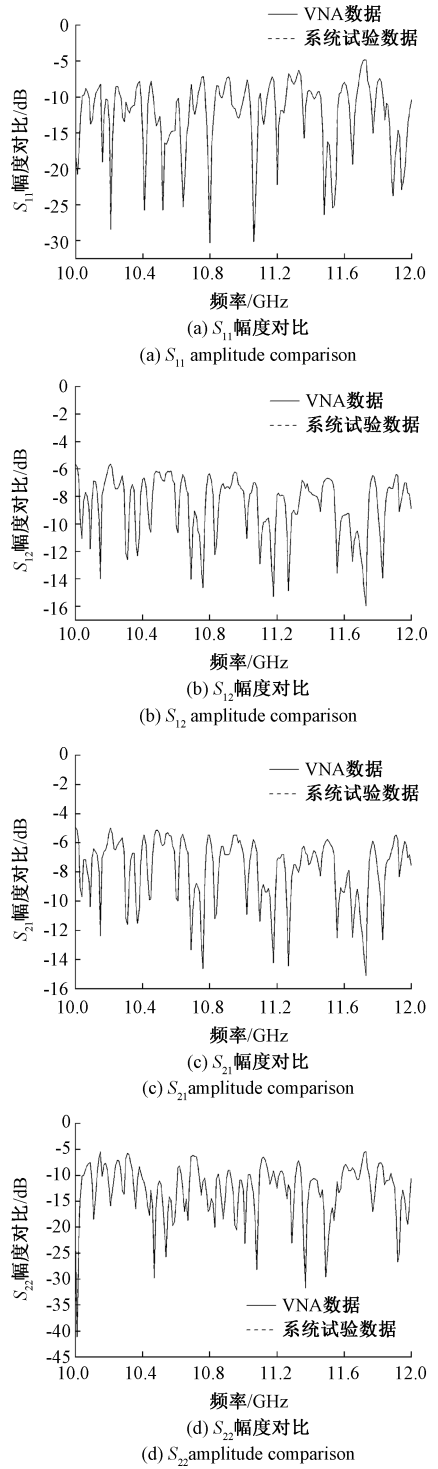


图 8 S 参数波形图对比
Fig. 8 Comparison of S-parameter waveform diagrams

网络分析仪在线系统的功能差异, 差异点如表 6 所示。

综上, 试验所期望达到的目标已经基本实现, 通过多次重复试验, 系统也不会出现报错。因此, 所设计的基于云的矢量网络分析仪在线系统较传统的矢网在线系统具有稳定性和创新性等特点。

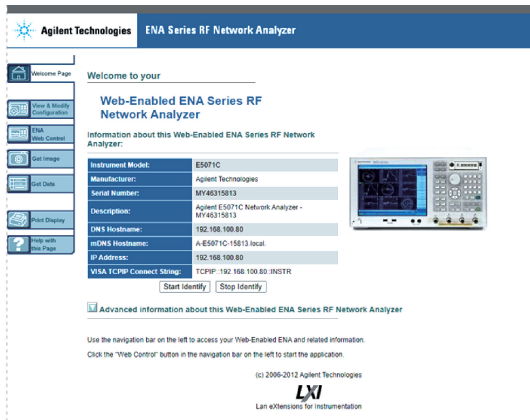


图 9 是德科技系统自配网页

Fig. 9 Keysight technologies system custom webpage

表 6 两个系统主要功能的区别

Table 6 The difference in the main functions of the two systems

主要功能差异	基于云的矢量网络分析仪在线系统	是德科技自配系统
S 参数数据	有双端口 S 参数的数据	仅有当前测量的 S 参数数据
S 参数波形图	由数据生成,可以标记读数或取最大最小值	仅为当前仪器页面截图,无其他功能
能否通过页面操作仪器	可以改变测量的初始频率、截止频率、采样点以及输出功率	不可以
能否通过公网访问	可以	仅支持仪器本地局域网访问
能否后期新增更多功能	通过后期更新前后端代码即可完成功能更新	不可以

4 结 论

本文提出了一种基于云的矢量网络分析仪在线系统软件设计,实现了矢量网络分析仪与本地电脑交互、数据上云保存、S 参数分析处理、数据可视化网页开发等功能。该系统设计的核心思路是通过云计算平台实现矢量网络分析仪数据的实时处理和展示,采用了 Python 语言编写的 SCPI 命令控制、数据传输协议 SSH 以及 Web 开发框架 Django 等核心技术。本研究的难点在于确保数据传输的实时性和系统的稳定性,通过实验验证,系统能够稳定、高效地获取和处理矢量网络分析仪的数据,具有良好的工程应用前景。未来工作将进一步优化数据处理算法,提高系统的智能化水平,并扩展更多的应用场景,如支持更多类型的矢量网络分析仪和增加数据分析功能。综上,本研究为矢量网络分析仪的远程控制和数据处理提供了一种新颖、实用的解决方案,具有重要的理论和实际应用价值。

参考文献

[1] CHRISS H, T R J, SAVIO T. Calibration of vector network analyzer for measurements in radio frequency propagation channels [J]. JoVE (Journal of Visualized Experiments), 2020(160): e60874.

[2] 郭庭铭,苏江涛,刘军,等. 宽带矢量网络测试的 TRM 校准方法不确定度分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 79-85.

GUO T M, SU J T, LIU J, et al. Uncertainty analysis of TRM calibration method for broadband vector network testing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 79-85.

[3] 金伟正,黄奕博,陈政宇,等. 基于软件的微型矢量网络分析仪的设计 [J]. 实验技术与管理, 2022, 39(9): 127-131.

JIN W ZH, HUANG Y B, CHEN ZH Y, et al. Design of miniature vector network analyzer based on software [J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(9): 127-131.

[4] LEI Z, ZHOU H, HU W, et al. Concurrent experimentation in NCSLab: A scalable approach for online laboratories [J]. Future Generation Computer Systems, 2023, 148: 139-149.

[5] SÁENZ J, DE LA TORRE L, CHACÓN J, et al. A study of strategies for developing online laboratories [J]. IEEE Transactions on Learning Technologies, 2021, 14(6): 777-787.

[6] WANG Y, CHEN Z, DENG Y. Cloud server-assisted remote monitoring and core device fault identification for dynamically tuned passive power filters [J]. Applied Sciences, 2023, 13(17): 9830.

[7] 赵俊艳,刘公政,万勇,等. 基于采算分离的信号分析系统设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(5): 69-76.

ZHAO J Y, LIU G ZH, WAN Y, et al. Design and implementation of signal analysis system based on sampling separation [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(5): 69-76.

[8] SONMORE V M, GAUR R K, TRIPATHI G C, et al. An automatic RF measurements with vector network analyzer [C]. 2023 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON). IEEE, 2023: 1-5.

[9] 罗阳杰,陈志,姚洪奎. 矢量网络分析仪自动计量测试系统研究 [J]. 计量与测试技术, 2021, 48(10): 36-37, 41.

LUO Y J, CHEN ZH, YAO H K. Research on automatic calibration and testing system for vector network analyzer [J]. Metrology and Measurement Technology, 2021, 48(10):

- 36-37,41.
- [10] 蒋波, 苟秀梅, 李胜, 等. 基于 LabWindows/CVI 的矢量网络分析仪自动检定系统[J]. 中国高新科技, 2020(17):41-42.
JIANG B, GOU X M, LI SH, et al. Automatic calibration system for vector network analyzer based on LabWindows/CVI[J]. China High Technology, 2020(17): 41-42.
- [11] KANG J, SHE F, ZHANG W, et al. Application of network analyzer based on the automatic control of LabVIEW in radio and television test [C]. 2013 International Symposium on Biometrics and Security Technologies. IEEE, 2013: 14-19.
- [12] 盛文举, 马清峰. 基于 SCPI 命令的函数信号发生器程控软件设计[J]. 电子测试, 2022, 36(21):87-89.
SHENG W J, MA Q F. Software design of function signal generator programmable control based on SCPI commands[J]. Electronic Testing, 2022, 36(21): 87-89.
- [13] BALAJI B A, SASIKUMAR S, RAMESH K. SCPI based integrated test and measurement environment using LabVIEW[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021, 1045(1): 012036.
- [14] LIC V T, CANH N T D, FABIEN F, et al. The novel combination of nano vector network analyzer and machine learning for fruit identification and ripeness grading[J]. Sensors, 2023, 23(2):952-952.
- [15] ALDO M, S S A, TAOUFIK M. S-parameter sampling in the frequency domain and its time-domain response[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-13.
- [16] 申龙. 对矢量网络分析仪频域至时域转换过程的探究[J]. 电子测试, 2022, 36(11):47-49, 71.
SHEN L. Exploration of the frequency domain to time domain conversion process for vector network analyzers[J]. Electronic Testing, 2022, 36(11):47-49, 71.
- [17] WU S, ZHANG Y, ZHANG J, et al. Microwave meta-absorber by using smith chart[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2024, 66(1): e33957.
- [18] FAN Z, PAN T, MA L. Development of metal polishing dust monitoring system using the internet of things and cloud Server [J]. International Journal of Online and Biomedical Engineering, 2019, 15(4):53-68.
- [19] 苏庆林, 李蕾. Python 基于 SSH 协议实现 Linux 系统远程管理方法研究[J]. 信息系统工程, 2019, (12):51-52, 55.
SU Q L, LI L. Research on remote management method of Linux system based on Python and SSH protocol[J]. Information Systems Engineering, 2019, (12): 51-52, 55.
- [20] 陈庆. 基于现代网络安全的密码学发展现状分析[J]. 家电维修, 2024, (2):59-61, 55.
CHEN Q. Analysis of the current development status of cryptography based on modern network security [J]. Household Appliance Maintenance, 2024, (2): 59-61, 55.
- [21] 陈仕许. MySQL 数据库在 PHP 网页中的动态应用研究[J]. 信息记录材料, 2021, 22(9):112-113.
CHEN SH X. Research on dynamic application of MySQL database in PHP Web pages[J]. Information Recording Materials, 2021, 22(9): 112-113.
- [22] A. C G, V. D D, R. D Z, et al. A comparative study of mongoDB and document-based MySQL for big data application data management[J]. Big Data and Cognitive Computing, 2022, 6(2):49-49.

作者简介



沈嘉诚, 2022 年于宁波工程学院获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为微波检测。

E-mail: P22030854042@cjlu.edu.cn

Shen Jiacheng received his B. Sc. degree from Ningbo University of Technology in 2022.

Now he is a M. Sc. candidate of China Jiliang University. His main research interest includes microwave detection.



裘国华 (通信作者), 1998 年于重庆大学获得学士学位, 2003 年于重庆大学获得硕士学位, 2012 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学副教授, 主要研究方向为微波检测、信号与信息处理。

E-mail: qghfr@163.com

Qiu Guohua (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 1998, M. Sc. degree from Chongqing University in 2003 and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2012, respectively. Now he is an associate professor in China Jiliang University. His main research interests include microwave detection and signal and information processing.