

暑期实习技术报告

——蓝牙射频测量方案及远程实验开关控制系统开发



姓 名：刘 前

班 级：无 47

学 号：2014011216

实习单位：清华大学天津电子信息研究院

实习时间：2017/6/26 至 2017/8/6

目录

第一章	实习项目介绍.....	2
第二章	蓝牙射频测量方案.....	3
1	项目背景.....	3
2	蓝牙关键技术.....	3
2.1	工作频段与信道.....	4
2.2	调制方式.....	4
2.3	网络拓扑结构.....	5
2.4	跳频技术.....	6
2.5	数据包结构.....	8
3	蓝牙射频测量方案.....	8
3.1	射频测量方案结构.....	8
3.2	发射机测试方案.....	9
3.3	接收机测量方案.....	18
3.4	参考文献.....	23
第三章	远程实验开关控制系统.....	24
1	项目介绍.....	24
2	项目流程.....	24
3	软件设计.....	25
3.1	建立远程通信.....	25
3.2	常用控制指令.....	26
3.3	界面按键控制.....	28
3.4	软件设计示例.....	28
4	项目成果.....	32
第四章	实习项目总结.....	33

第一章 实习项目介绍

近年来，融合了无线通信、远程控制等诸多技术的智能家居，逐渐成为一个热门领域。智能家居是以家庭住宅为平台，利用网络通信、远程控制、综合布线等技术将家居生活设施进行功能集成，从而构建高效智能的住宅环境及家庭日常事务的管理系统。

本人暑期的生产实习项目在智能家居的宏观背景下展开，但由于资源条件和时间限制，实习中弱化了智能家居的概念。实习项目主要从智能家居领域**涉及的基础技术**出发，包括基础的**蓝牙无线通信技术和远程控制技术**原理，进行相关测量方案的设计远程控制系统的开发。

本次实习共包含以下两个项目：

1. 蓝牙射频测量方案

通过学习蓝牙无线通信涉及的关键技术，对蓝牙原理有基本的掌握，并基于所学的技术原理及蓝牙的官方文档，分析蓝牙信号的测试需求，设计总结蓝牙射频测量方案。满足指标的设备能够在蓝牙协议下建立起可靠的通信，从技术层次来说这为后面的远程控制做基础通信准备。

2. 远程实验开关控制系统设计

建立了通信之后，更高层次则需要通过使用设备相应的控制指令，执行编程的操作，实现远程控制的功能。远程实验开关控制系统正是对远程控制技术进行的初步尝试，主要包含电路设计、电路搭建、电路测试、界面设计与软件控制等内容。本项目是小组合作项目，个人主要负责软件控制功能，需要学习仪器设备支持的指令集，然后远程发送指令到仪器实现控制功能。

第一个项目完全由**个人完成**，第二个项目是**小组合作完成**，本人负责软件部分的设计与代码实现。两个项目涉及的技术原理、具体方法和成果将在各项目中详细进行说明。

第二章 蓝牙射频测量方案

本章介绍实习的第一个项目，主要目标是通过学习蓝牙的关键技术原理，分析蓝牙信号的测量需求，最终设计总结蓝牙射频的测量方案。

项目背景部分介绍蓝牙技术的发展和目前的应用，并且强调了蓝牙认证中蓝牙射频测量的必要性。**蓝牙关键技术**部分则从射频测量的角度出发，对测量中需要了解掌握的原理进行学习、梳理与总结。**蓝牙射频测量方案**部分详细地列出了蓝牙射频的指标和测量方法，在实际测试中具有较大参考价值。

1 项目背景

蓝牙 (Bluetooth) 技术是一种支持设备短距离通信的无线技术标准，目前广泛应用于智能手机、笔记本电脑、耳机、音箱等众多设备之间信息的无线交换，而且成为当前物联网、智能家居等行业中的关键技术之一，目前正受到全球各界的广泛关注，具有广泛的应用前景。

对于蓝牙产品，需要进行蓝牙认证。蓝牙认证设置的目的在于保护蓝牙无线互联技术的一致性，帮助不同厂商的蓝牙产品实现互通，提高互操作性，降低资格认证的成本和复杂度。认证是基于一套参考测试系统的一致性测试以及与其他符合标准的蓝牙产品之间的互通性测试，其中最重要的测试项目之一就是蓝牙射频测试。

本项目正是以蓝牙认证中的射频测试为基础的。

2 蓝牙关键技术

蓝牙是一种短程宽带的无线通信技术，是实现语音和数据无线传输的全球开放性标准。本部分重点关注在射频测量中涉及的关键技术原理，主要包括：

- 工作频段与信道
- 调制方式
- 网络拓扑结构
- 跳频技术
- 数据包结构

以上技术对于理解蓝牙技术基本原理、进行射频测量方案的设计非常关键，在后文会详细对每项技术原理进行分析。

2.1 工作频段与信道

蓝牙设备工作在 2.4GHz，即工业、科学、医学 (ISM) 频段。ISM 频段主要是开放给工业、科学、医学三个主要机构使用，无需授权许可，只需遵守一定的发射功率（一般低于 1W），并且不要对其它频段造成干扰即可。因而，蓝牙必须和其他无线通信标准共用频段，比如无线局域网 (Wireless Local Area Network, WLAN)。

一般蓝牙使用 2.402GHz 至 2.48GHz 之间的 79 个信道上，载频为 $(2402 + k)$ MHz ($k=0, 1, 2, \dots, 78$)，载频的间隔为 1MHz。蓝牙 4.0 标准之后更改载频间隔为 2MHz，频道数变为 40。

2.2 调制方式

2.2.1 高斯频移键控

蓝牙使用 BT 指标为 0.5 的高斯频移键控 (Gauss frequency Shift Keying, GFSK) 数字频率调制技术。GFSK 高斯频移键控调制是把输入数据经高斯低通滤波器预调制滤波后，再进行 FSK 调制的数字调制方式。使用 GFSK 进行调制，主要目的是限制信号的频谱宽度，从而减小两个不同频率的载波切换的跳变能量。

BT 指标是系统的重要指标，B 是高斯滤波器的 3dB 带宽，T 是输入的一个码元的宽度。BT = 0.5 表明高斯低通滤波器的 3dB 带宽是码元速率的 0.5 倍。

2.2.2 语音调制方式

连续可变斜率增量调制 (Continuous Variable Slope Delta Modulation, CVSD) 是自适应量化器的差分调制 (Differential Modulation, DM)。对差分调制量化器使用自适应技术可以连续调整量化步长，编码器因此可以高准确度地展现出小幅度信号，而不牺牲大信号的性能。CVSD 的抗衰落性强，即使误码率达到 4%，语音的质量仍然可接受。

2.2.3 $\pi/4$ -DQPSK 与 8DPSK

在蓝牙的 EDR (Enhanced Data Rate) 模式下，数据的调制方式发生了改变。接入码 (Access Code) 和分组头 (Packet Header) 仍通过 GFSK 调制方式传输，而后面的同步序列、尾序列等则通过相移键控 (Phase Shift Key) 调制方式来传输。

2Mbps 的相移键控调制传输采用的是 $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK ($\frac{\pi}{4}$ -四相相对相移键控) 调制方式, 每个码元代表 2 比特的信息。3Mbps 的相移键控调制传输采用循环差分相位编码的八进制键控方式 (8DPSK), 其中每个码元代表 3 比特的信息。

对于 $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK 和 8DPSK, 支持 EDR 的蓝牙设备不具有强制要求。调制方式应采用平方根形式的升余弦脉冲, 以便产生等效的载有信息的低通信号。发射机输出是一个带通信号。

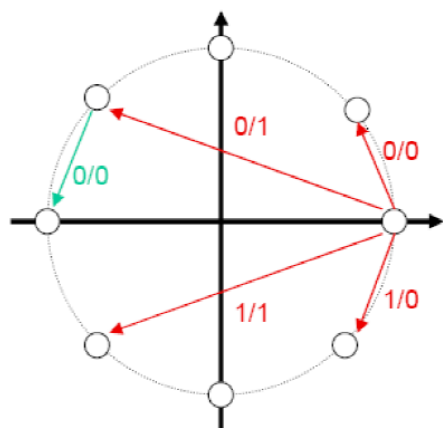


图 1 $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK 星座图

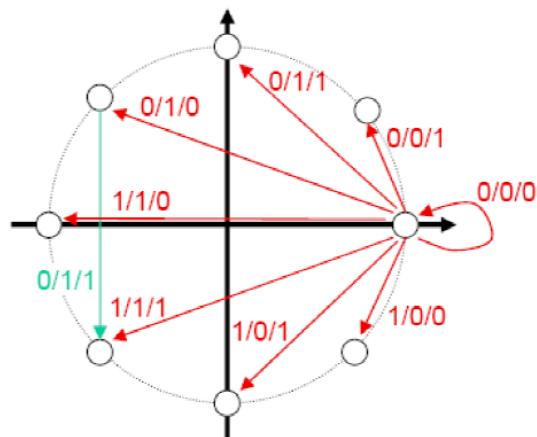


图 2 8DPSK 星座图

2.3 网络拓扑结构

蓝牙设备按特定方式可组成两种网络: 微微网 (Piconet) 和分散网 (Scatternet)。

2.3.1 微微网

微微网 (Piconet) 是由蓝牙技术的设备以特定方式组成的网络。微微网的建立是由两台设备的连接开始, 最多由 8 台设备构成。使用三个比特位给微微网中的从设备进行编号 (称为蓝牙设备的 MAC 地址), 每个设备编号不同。

在微微网中如果某台设备的时钟和跳频序列用于同步其他设备, 则称它为主设备, 其他设备称为从设备。

2.3.2 分散网

分散网 (Scatternet) 是由多个独立、非同步的微微网形成, 依靠调频顺序识别每个微微网。分散网允许多个设备共享同一区域, 高效利用带宽。

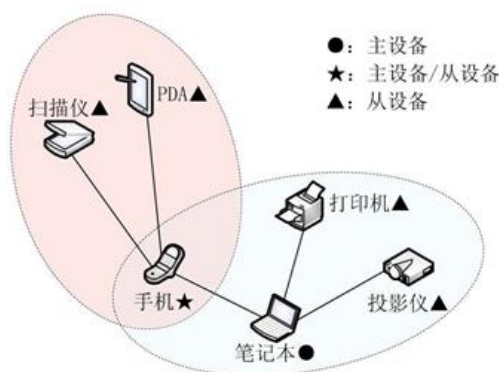


图 3 分散网示意图

2.4 跳频技术

自适应跳频 (Adaptive Frequency-Hopping, 简称 AFH) 功能通常每秒跳 1600 次，在建立连接 (包括寻呼和查询) 时提高为 3200 跳/秒。蓝牙通过快跳频和短分组技术减少同频干扰，保证传输的可靠性。

2.4.1 时隙

每个微微网跳变序列唯一，由主设备的蓝牙设备地址决定。跳变序列的相位由主设备时钟决定。在微微网中，所有单元在时间与调频上与信道的变化同步。信道分为时隙，每个时隙长 $625\mu\text{s}$ ，相应地有一个跳频频率，通常跳频频率为 1600 跳/s。系统使用时分双工方案使得主设备和从设备交替传送。主设备在偶数时隙发送数据，在奇数时隙接收数据；从设备在偶数时隙接收数据，在奇数时隙发送数据。数据分组的收发起始时刻必须与时隙精确同步。

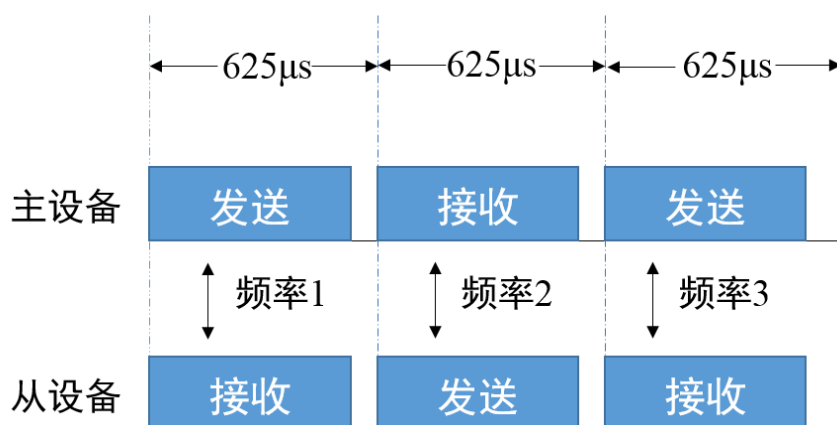


图 4 时分双工

根据数据分组的大小不同，一个数据分组可以占用 1 至 5 个时隙进行发送与接收。发送一个数据分组占用 1 个时隙称为单时隙结构，占用 1 个以上时隙称为多时隙结构。

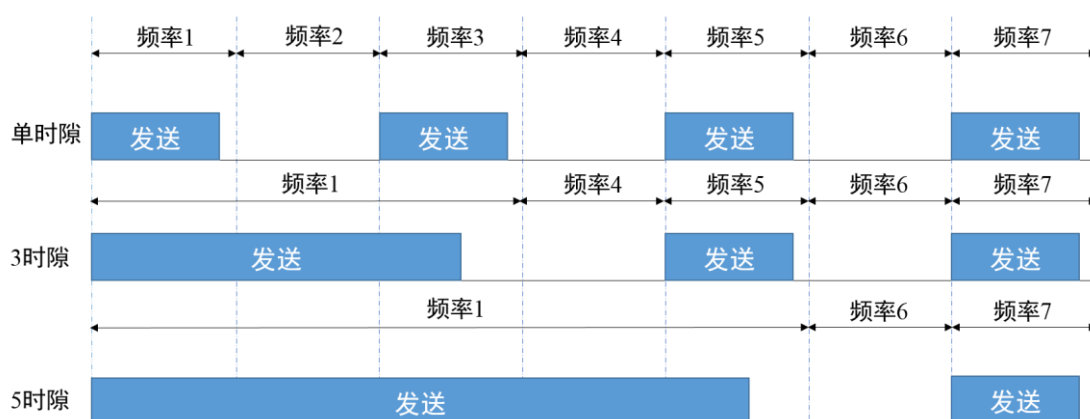


图 5 单时隙和多时隙分组的发射速率

2.4.2 自适应跳频技术

自适应跳频技术是建立在自动信道质量分析基础上的一种频率自适应和功率自适应控制相结合的技术。该技术能够使得跳频通信过程主动避开被干扰的调频频点，并且以最小的发射功率，达到在无干扰的跳频信道上长时间保持优质通信的目的。

蓝牙的自适应跳频技术主要由设备识别、信道分类、分类信息交换、自适应跳频四个步骤组成。

设备识别 当一个从设备接入微微网中，在进行通信之前，由链路管理协议交换信息，确定双方设备是否支持自适应跳频模式、链路管理协议信息中包含了双方设备应使用的最小信道数。

信道分类 根据信道的传输质量，按链路管理协议格式形成分类表。在主从设备之间交换信息之后，以分类表为依据进行自适应跳频。信道分类采用时分形式，从而抗瞬间的干扰。

信道信息交换 主设备对信道进行分类之后，将分类情况通知从设备；同时从设备将自己的情况通知主设备。至此，主从设备之间建立起联系，确定了哪些信道是可用的。

执行自适应跳频 由于微微网中常有新的通信建立或原来的通信撤销，因而信道的传输质量在动态改变，需要周期性地对信道重新估计，及时发现不能用的信道。

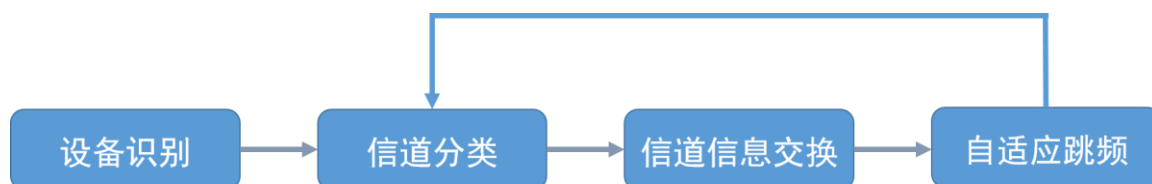


图 6 自适应跳频技术一般步骤

2.5 数据包结构

微微网信道内的数据都是通过数据包进行传输。通常的数据包格式为：接入码 72 比特，数据包的包头为 54 比特，有效载荷为 0 至 2745 比特。



图 7 蓝牙基本数据包结构

接入码用于时序同步、寻呼及查询。数据包的包头包含了数据包确认、乱序数据包重新排序后的编号、从单元的地址以及包头错误检查等信息。数据包的有效载荷包含了语音、数据等信息。整个数据包占用一个以上的时隙（多时隙数据包），也可以在下一个时隙中持续传输。

蓝牙 1.x 版本能够达到 1Mbps 的数据传输速率。蓝牙 2.x 的主要改进是使用 EDR 数据包结构，能够将蓝牙无线连接带宽提高到 3Mbps，是 1.x 版本的 1Mbps 的 3 倍，实现更快速的连接。蓝牙 2.x 同时支持多条蓝牙链路，实现新的更高带宽的应用。



图 8 蓝牙 EDR 数据包结构

3 蓝牙射频测量方案

蓝牙射频测量是蓝牙产品在认证测试中的重要步骤之一，主要用于验证蓝牙产品的射频性能是否符合蓝牙射频规范。对于射频测量，需要包含一台测试设备和被测设备 (DUT, Device Under Test)，其中测试设备称为主设备，对测试过程具有完全控制权；DUT 称为从设备。两者之间可以通过射频电缆相连，也可以通过天线经空中传输相连，从而组成一个微微网。

射频测量方案中主要使用的仪器是蓝牙综合测试仪和频谱分析仪。

3.1 射频测量方案结构

按照发射机和接收机分类，主要有很多项需要测试的指标，诸多测试指标能够反映出蓝牙设备的性能是否合乎要求。根据以下蓝牙的核心规范和测试规范，可以整理得到蓝牙射频的测试指标及测试方法，整体测量方案结构见表 1。限于篇幅，本文只选择了部分测量指标。

- ✧ Bluetooth Test Specification v1.2/2.0/2.0 + EDR/2.1/2.1 + EDR/3.0/3.0 + HS/4.0.
- ✧ Specification of the Bluetooth System, Core System Package, Volume 2, Part A.
- ✧ Specification of the Bluetooth System, Core System Package, Volume 3, Part D.

	测量项目	说明
发射机	输出功率	发射机的输出功率(包括峰值功率和平均功率)
	功率密度	发射机输出的(最大)功率谱密度
	功率控制	限制发射机的输出功率
	发射频谱的频率范围	检测发射机的发射范围是否在频段范围之内
	发射频谱的 20dB 带宽	发射机的发射范围 (左右功率范围均为 20dB)
	发射频谱的邻信道功率	相邻信道的泄露功率在某一范围内
	调制特性	检验调制参数特性。
	初始载波频率容限	检验载波频率的准确度
	载波频率漂移	发送有效载荷时频率与初始载频之差
	EDR 相对发送功率	确保在一个数据包中, 以 GFSK 调制的部分与 DPSK 调制的部分之差在一定范围之内
	EDR 载波频率稳定性和调制精确度	载波频率的稳定度以及调制的准确度
	EDR 差分相位编码	检验差分相位编码的准确度
	EDR 带内杂散发射	相邻信道的功率谱密度在某一范围内
接收机	单时隙包灵敏度	非理想环境下, 接收单时隙数据包最小信号的能力
	多时隙包灵敏度	非理想环境下, 接收多时隙数据包最小信号的能力
	载波干扰比性能	有干扰环境下的接收能力, 以误码率 BER 来表征
	阻塞特性	其它频段存在大干扰信号时, 接收有用信号的能力
	最大输入电平	接收机抵抗大信号的能力
	EDR 灵敏度	非理想环境下, BER 为 10^{-4} 的最小接收电平
	EDR 误码率平坦性能	非理想环境下, BER 为 10^{-5} 的最小接收电平
	EDR 载波干扰比性能	有干扰环境下的接收能力, 以误码率 BER 来表征
	EDR 最大输入电平	接收机抵抗大信号的能力

表 1 蓝牙射频测量方案结构

3.2 发射机测试方案

3.2.1 输出功率

1. 测量目的

检测发射机的输出功率 (包括峰值功率和平均功率) 是否处于合理的范围。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为跳频
- 2) DUT (测试设备) 置为环回 (Loop Back) 或发射机模式
- 3) 发射有效载荷: PRBS9
- 4) 发射分组类型: 可支持最大长度的分组
- 5) 是否为最大功率: 是

3. 频谱分析仪参数设置

- 1) 中心频率：最低的工作频率
- 2) 频率跨度 SPAN：0
- 3) 分辨率带宽：3MHz
- 4) 视频带宽：3MHz
- 5) 检波器：峰值(Peak)
- 6) 检波模式：清除写入(Clear/Write)
- 7) 扫描时间：大于 1 分钟
- 8) 触发方式：外触发

4. 测量步骤：

- 1) 检波器设为峰值 Peak，测量得到峰值功率
- 2) 检波器设为平均值 Average，测量得到平均功率

5. 合格指标：

蓝牙测试规范 4.0.2 要求，发射机输出的峰值功率应小于 23dBm。

对于发射机输出的平均功率：

- a) 若 DUT 的功率等级为 1，则要求平均功率大于 0dBm；
- b) 若 DUT 的功率等级为 2，则要求平均功率在 -6dBm 和 4dBm 之间；
- c) 若 DUT 的功率等级为 3，则要求平均功率小于 0dBm。

3.2.2 功率密度

1. 测量目的

检测发射机输出的 (最大) 功率密度是否处于合理范围。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为跳频
- 2) DUT (测试设备) 置为环回 (Loop Back) 或发射机模式
- 3) 发射分组类型：可支持的最大长度的分组
- 4) 发射有效载荷：PRBS9
- 5) 是否为最大功率：是

3. 频谱分析仪参数设置

- 1) 中心频率：2441MHz
- 2) 频率跨度 SPAN：240MHz
- 3) 分辨率带宽：100kHz
- 4) 视频带宽：100kHz
- 5) 检波器：峰值 (Peak)
- 6) 检波模式：最大值保持模式

7) 扫描时间: 1s/100kHz

8) 触发模式: 自由触发

4. 测量步骤

1) 查找峰值 (Peak Search) , 记录包络最大功率点的频率 M ;

2) 频谱仪中心频率设置为 M , 频率跨度 SPAN 设置为 3MHz;

3) 按照 2 中频谱仪的参数设置, 使用 Peak Search, 记录包络最大功率 D dBm/MHz (功率谱密度测试选项) ;

4) 计算功率密度: $\text{Power Density} = D + G + 10\lg(1/x)$

其中 G 为天线增益, x 为占空比。

5. 合格指标

功率密度 $< 20\text{dBm}(100\text{mW})/100\text{kHz}$

3.2.3 功率控制

1. 测量目的

功率控制用于限制发射功率使之不超过 0dBm, 在 0dBm 以下时, 发射机功率控制是可选的, 主要用于优化功率消耗和整体的干扰电平。

功率输出增益控制采用了一种单调序列步进方式, 这种步进增益由两种方式组成, 一种是高步进增益 (每步 8 dB) , 另一种是低步进增益 (每步 2 dB) 。一个具有 20dB 的功率级别为 1 的设备必须具有调整其功率到达 4dB 以下的能力。

2. 综合测试仪设置

1) 链路为非跳频

2) DUT (测试设备) 置为环回 (Loop Back) 或发射机模式

3) 发射分组类型: DH1

4) 发射有效载荷: PRBS9

5) 是否为最大功率: 是

3. 频谱分析仪参数设置

1) 中心频率: 最低的工作频率

2) 频率跨度 SPAN: 0

3) 分辨率带宽: 3MHz

4) 视频带宽: 3MHz

5) 检波模式: 清除写入(Clear/Write)

6) 扫描时间: 传递一个完整的 DH1 数据包的时长

7) 触发方式: 外触发

4. 测试步骤

1) 检测器设置为平均值 (Average) , 测量被测设备的平均发射功率

2) 使用单调序列步进方式测量功率的步长 s

5. 合格指标

- 1) 功率控制的步长 s 满足: $2\text{dB} \leq s \leq 8\text{dB}$
- 2) 对于功率等级为 1 的被测设备, 要求平均功率 $P_{\text{AV}} \leq 4\text{dBm}$

3.2.4 发射频谱的频率范围

1. 测量目的

检测发射机的发射范围是否在频段范围之内。

规范要求对于低信道扫描频率从 2399MHz 到 2405MHz, 对于高信道扫描频率从 2475MHz 到 2485MHz。在低信道时, 找出频谱功率密度低于低信道功率 80 dBm/Hz 的频点 f_L ; , 在高信道时, 找出频谱功率密度低于低信道功率 80 dBm/Hz 的频点 f_H 。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频
- 2) DUT (测试设备) 置为环回 (Loop Back) 模式
- 3) 发射分组类型: DH1
- 4) 发射有效载荷: PRBS9
- 5) 是否为最大功率: 是

3. 频谱分析仪参数设置

- 1) 中心频率: 发射机的最低工作频率
- 2) 频率跨度 SPAN 设置大于信号的包络
- 3) 分辨率带宽: 100kHz
- 4) 视频带宽: 300kHz
- 5) 检波器: 峰值(Peak)
- 6) 检波模式: 平均(Averaging)
- 7) 扫描时间: 2s
- 8) 触发模式: 外部触发
- 9) 扫描点数: 50

4. 测量步骤

- 1) 蓝牙综合测试仪和频谱分析仪分别按照 1 和 2 中进行设置, 到频谱位于工作频率低端的功率谱降到-80dBm/Hz 的最低频率, 记作 f_L ;
- 2) 将频谱仪中心频率设置在最高工作信道频率上, 其余参数设置与之前描述相同, 找到频谱上位于工作频率高端的功率谱密度降到-80dBm/Hz 的最高频率, 记作 f_H 。

5. 合格指标

对于 79 信道的系统，反射机输出的频率 f 的范围为：

$$2400\text{MHz} \leq f \leq 2483.5\text{MHz}$$

3.2.5 发射频谱的 20dB 带宽

1. 测量目的

检测发射机的发射范围 (左右功率范围均为 20dB) 是否在信道范围之内。

被测设备 (DUT) 分别工作在低、中、高三个频点，回送调制信号为 PN9 的 DH1 分组。扫描找到对应最大功率的频点，并且找到其左右两侧对应功率下降 20dB 时的 f_L 和 f_H ，20dB 带宽 $\Delta f = f_H - f_L$ 。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频
- 2) DUT (测试设备) 置为环回 (Loop Back) 模式
- 3) 发射分组类型：DM 或 DH 支持的最大长度的分组
- 4) 发射有效载荷：PRBS9
- 5) 是否为最大功率：是

3. 频谱分析仪参数设置

- 1) 中心频率：最低工作信道频率
- 2) 频率跨度 SPAN：3MHz
- 3) 分辨率带宽：10kHz
- 4) 视频带宽：30kHz
- 5) 检波器：峰值 (Peak)
- 6) 检波模式：最大值保持模式
- 7) 扫描时间：大于 1 秒
- 8) 触发模式：自由触发
- 9) 扫描点数：10

4. 测量步骤

- 1) Peak Search 查找发射信道的最大功率值 P；
- 2) 发射信道中心频率的低端，功率值降到步骤 1) 中测得数值 20dB 以下的最低频率，记为 f_L ；
- 3) 发射信道中心频率的高端，功率值降到步骤 1) 中测得数值 20dB 以下的最高频率，记

为 f_H ;

4) 20dB 的带宽定义为 $f_H - f_L$ 。

5. 合格指标

- 1) 若功率 $P \geq 0\text{dBm}$, 则要求 20dB 带宽 $\Delta f = f_H - f_L \leq 1.0\text{MHz}$
- 2) 若功率 $P < 0\text{dBm}$, 则要求 20dB 带宽 $\Delta f = f_H - f_L \leq 1.5\text{MHz}$

3.2.6 发射频谱的邻信道功率

1. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频
- 2) DUT (测试设备) 置为环回 (Loop Back) 模式
- 3) 发射分组类型: DH1
- 4) 发射有效载荷: PRBS9
- 5) 是否为最大功率: 是

2. 频谱分析仪参数设置

- 1) 中心频率: 所选信道频率-450kHz
- 2) 频率跨度 SPAN: 0
- 3) 分辨率带宽: 100kHz
- 4) 视频带宽: 300kHz
- 5) 检波器: 平均 (Average)
- 6) 检波模式: 最大值保持模式
- 7) 扫描时间: 100ms
- 8) 触发模式: 外触发
- 9) 扫描点数: 10 个以上

3. 测量步骤

DUT 工作频点分别为第 3 信道、第 39 信道和第 75 信道, 回送净荷为 PN9 的 DH1 分组。测试仪扫描整个蓝牙频段, 测试各个信道的功率。

4. 合格指标

- 1) 对于相邻第 2 信道, 泄露功率 $\leq -20\text{dBm}$;
- 2) 对于相邻第 3 及以外的信道, 泄露功率 $\leq -40\text{dBm}$ 。

3.2.7 初始载波频率容限

1. 测量目的

本项测量的目的是检验载波频率的准确度。

2. 综合测试仪设置

- 1) DUT 置为环回模式或发射机模式
- 2) 发射分组类型: DH1
- 3) 发射有效载荷: PRBS9
- 4) 是否为最大功率: 是

3. 测量步骤

综合测试仪先将链路置为非跳频, DUT 分别工作在低、中、高三个频点, 然后测试仪再将链路置为跳频。测试仪能够根据 4 个前导码计算载波频率 f_0 。

5) 合格指标

若工作频点 f_T , 测量的载波频率为 f_0 , 则要求

$$f_T - 75\text{kHz} \leq f_0 \leq f_T + 75\text{kHz}$$

3.3.8 载波频率漂移

1. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频
- 2) DUT 置为环回模式且关闭白噪声, 或置为发射机模式
- 3) 发射分组类型: DH1/DH3/DH5
- 4) 发射有效载荷: PRBS9
- 5) 是否为最大功率: 是

2. 测量步骤

- 1) DUT 分别工作在低、中、高三个频点, 回送调制信号为 10101010 的 DH1/DH3/DH5 分组;
- 2) 综合测试仪先根据 4 个前导码计算载波频率, 然后每 10 比特有效载荷测试一次频率, 其与初始载频的差为**瞬时频率漂移**;
- 3) 测试仪将跳频打开, 重新测试所有频点下的瞬时频率漂移。瞬时频率漂移之间的差定义为**载波漂移速率**。

3. 合格指标

- 1) 对于 DH1 分组, 要求每次的瞬时漂移小于 25kHz, 对于 DH3、DH5 分组, 要求载波瞬

时漂移小于 40kHz。

数据包分组类型	瞬时频率漂移
DH1 (单时隙包)	- 25kHz ~ + 25kHz
DH3 (三时隙包)	- 40kHz ~ + 40kHz
DH5 (五时隙包)	- 40kHz ~ + 40kHz

表 4 载波瞬时频率漂移合格指标

2) 载波漂移速率小于 4 kHz/10 μ s。

3.2.9 EDR 相对发射功率

1. 测量目的

确保在一个数据包中，以 GFSK 调制的部分与 DPSK 调制的部分之差在一定范围之内。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频
- 2) DUT 置为环回模式且关闭白噪声，或置为发射机模式
- 3) 发射分组类型：2-DHx 或 2-Evx，8DPSK 调制时选择支持的最大数据包。
- 4) 发射有效载荷：PRBS9
- 5) 是否为最大功率：是

3. 频谱分析仪参数设置

- 1) 中心频率：DUT 的发射频率
- 2) 频率跨度 SPAN：0
- 3) 分辨率带宽：3MHz
- 4) 视频带宽：3MHz
- 5) 检波器：平均值 (Average)
- 6) 检波模式：清除写入 (Clear/Write)
- 7) 扫描时间：取决于包的类型
- 8) 触发模式：外触发
- 9) 扫描点数：10

4. 测量步骤

- 1) 测量接入码和包头传输过程中的平均功率 PGFSK；
- 2) 测量同步序列和有效载荷传输过程中的平均功率 PDPSK；

5. 合格指标

相对功率即： $\Delta P = PGFSK - PDPSK$ ，应满足 $-4dB \leq \Delta P \leq 1dB$

3.2.10 EDR 差分相位编码

1. 测量目的
检验差分相位编码的准确度。
2. 综合测试仪设置
 - 1) 链路为非跳频
 - 2) DUT 置为环回模式且关闭白噪声，或置为发射机模式
 - 3) 发射分组类型：
 - i. 对 $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK 调制，选择 2-DH1 或 2-EV3
 - ii. 对 8DPSK 调制，选择 3-DH1 或 3-EV3
 - 4) 发射有效载荷：PRBS9
 - 5) 是否为最大功率：是
3. 合格指标
99%的数据包错误率为 0

3.2.11 EDR 带内杂散发射

1. 综合测试仪设置
 - 1) 链路为非跳频
 - 2) DUT 置为环回模式且关闭白噪声，或置为发射机模式
 - 3) 发射分组类型：无要求
 - 4) 发射有效载荷：PRBS9
 - 5) 是否为最大功率：是
2. 频谱分析仪参数设置
 - 1) 中心频率：所选信道频率 - 450kHz
 - 2) 频率跨度 SPAN：0
 - 3) 分辨率带宽：100kHz
 - 4) 视频带宽：300kHz
 - 5) 检波器：平均值 (Average)
 - 6) 检波模式：清除写入 (Clear/Write)
 - 7) 扫描时间：取决于包的类型
 - 8) 扫描点数：10
3. 合格指标：
在 ISM 频带内传输伪随机信号的时候，功率谱密度应该符合下面的要求：
 - 1) 所有的测量功率都应该使用有最大上限的 100kHz 带宽。

- 2) 1MHz 到 1.5MHz 载波的功率至少应低于 500kHz 载波的最大功率 26dB。
- 3) 对于相邻的最少为 2MHz 载波的信道，它不能超过第二个相邻信道-20dBm，不能超过第三个和以后的相邻信道-40dBm。

以上要求在传输信号的开始时刻一直到信号能量的下降沿都应该得到满足。

3.3 接收机测量方案

3.3.1 单时隙数据包灵敏度

1. 测量目的

检测接收机在非理想环境下，接收单时隙数据包最小信号的能力。

注意：在测量灵敏度时，如果 DUT 支持有扰发射 (Dirty Transmitter)，综合测试仪必须仿真这一环境。蓝牙规范允许 DUT 发送的射频信号具有 75kHz 的初始误差和 40kHz 的频率漂移，即总共允许有 115kHz 的误差。对于有扰测试，蓝牙收信机的灵敏度一般会劣化 4~10dB，具体值与分组长度和蓝牙芯片种类有关。要考虑调制、符号定时等引起的误差。

假如 DUT 的收信机性能由一个输出“完美”信号的测试仪来测试，其测试结果不足以提供冗余度来适应真正的无线传输环境，用户将得到一个关于收信机质量的错误结果。此外，蓝牙基带信号还受一正弦波调制。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频 (有条件也可以在跳频条件下重复测量)
- 2) DUT 置为环回 (Loop Back) 模式
- 3) 发射分组类型：DH1
- 4) 发射有效载荷：PRBS9
- 5) 是否为最大功率：是
- 6) 综合测试仪发射功率：-70dBm
- 7) 是否有扰发射：根据 DUT 是否支持决定

3. 测量步骤

1. DUT 分别工作在低、中、高三个频点，回送调制信号为 PRBS9 的 DH1 分组。依照蓝牙规范的要求，测试仪控制其输出功率，以使 DUT 的收信功率为-70dBm；
2. 将干扰信号加入到发送的蓝牙信号中，每 20ms 一组，从第一组依次到第十组，再返回第一组，不断重复；
3. 使用综合测试仪的相关功能统计误码率。

4. 合格指标

误码率 $BER \leq 0.1\%$ (要求测试包的长度不少于 1,600,000 比特)

3.3.2 多时隙数据包灵敏度

1. 测量目的

检测接收机在非理想环境下，接收多时隙数据包最小信号的能力。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频
- 2) DUT 置为环回 (Loop Back) 模式
- 3) 发射分组类型: DH3、DH5 中 DUT 支持的最长数据包
- 4) 发射有效载荷: PRBS9
- 5) 是否为最大功率: 是
- 6) 综合测试仪发射功率: -70dBm
- 7) 是否有扰发射: 根据 DUT 是否支持决定

3. 测量步骤

- 1) DUT 分别工作在低、中、高三个频点，回送调制信号为 PRBS9 的 DH3 和 DH5 分组中支持的最长数据包。依照蓝牙规范的要求，测试仪控制其输出功率，以使 DUT 的收信功率为-70dBm；
- 2) 将干扰加入到发送的蓝牙信号中，每 20ms 一组，从第一组依次到第十组，再返回第一组，不断重复；
- 3) 使用综合测试仪的相关功能统计误码率。

4. 合格指标

误码率 $BER \leq 0.1\%$ (要求测试包的长度不少于 1,600,000 比特)

3.3.3 载波干扰比(C/I)性能

1. 测量目的

检测接收机在有干扰环境下的接收能力，结果以误码率 BER 来表征。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频
- 2) DUT 置为环回 (Loop Back) 模式
- 3) 发射分组类型: DH1
- 4) 发射有效载荷: PRBS9
- 5) 数据包大小: 1,600,000 比特

- 6) 是否为最大功率：是
 - 7) 综合测试仪发射功率：-70dBm
 - 8) 干扰：使用 GFSK 调制的 PRBS15，在蓝牙频段所有信道上连续发送
3. 其他仪器：
 - 1) 耦合器：2.5GHz
 - 2) 衰减器：2.5GHz
 - 3) 信号源
 4. 测量步骤
 - 1) 将干扰加入到发送的蓝牙信号中，分别测试第 3、39 和 75 个信道；
 - 2) 在每个信道上，每 20ms 一组数据，从第一组依次到第十组，不断重复；
 - 3) 使用综合测试仪统计误码率 BER。
 5. 合格指标
误码率 $BER \leq 0.1\%$

3.3.4 阻塞特性

1. 测量目的
阻塞特性是指在其它频段存在大的干扰信号时，接收机接收有用信号的能力。
2. 综合测试仪设置
 - 1) 链路为非跳频
 - 2) DUT 置为环回 (Loop Back) 模式
 - 3) 发射分组类型：DH1
 - 4) 发射有效载荷：PRBS9
 - 5) 是否为最大功率：是
 - 6) 综合测试仪发射功率：-70dBm
 - 7) 干扰：连续波干扰信号以 1MHz 为步进，具体干扰功率见表 7。

干扰信号频率	干扰信号功率
30—2000MHz	-10dBm
2000—2400MHz	-27dBm
2500—3000MHz	-27dBm
3000MHz—12.75GHz	-10dBm

测试时不同干扰信号频率对应的功率

3. 其他仪器：
 - 1) 耦合器：2.5GHz
 - 2) 衰减器：2.5GHz

3) 量程到 12.75GHz 的信号源

4. 测量步骤

- a) DUT 收发频点为 2460MHz (58 号信道)。测试仪不仅发送净荷为 PRBS9 的 DH1 分组作为有用信号，而且发送频率为 30MHz 到 12.75GHz 之间的连续波干扰信号；
- b) 在 58 号信道上，每 20ms 一组数据，从第一组依次到第十组，不断重复；
- c) 使用综合测试仪统计误码率 BER。

5. 合格指标

误码率 $BER \leq 0.1\%$

3.3.5 最大输入电平

1. 测量目的

检测接收机抵抗大信号的能力。

该项测试和灵敏度意义不同在于测试的是大信号，综合测试仪发送 -20dBm 的信号，检测接收机的误码率。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频
- 2) DUT 置为环回 (Loop Back) 模式
- 3) 发射分组类型: DH1
- 4) 发射有效载荷: PRBS9
- 5) 是否为最大功率: 是
- 6) 综合测试仪发射功率: -20dBm

3. 测量步骤

- 4) DUT 分别工作在低、中、高三个频点，回送调制信号为 PRBS9 的 DH1 分组。依照蓝牙规范的要求，测试仪控制其输出功率，以使 DUT 的收信功率为 -20dBm；
- 5) 将干扰加入到发送的蓝牙信号中，每 20ms 一组，从第一组依次到第十组，再返回第一组，不断重复；
- 6) 使用综合测试仪的相关功能统计误码率。

4. 合格指标

误码率 $BER \leq 0.1\%$ (要求测试包的长度不少于 1,600,000 比特)

3.3.6 EDR 灵敏度

1. 测量目的

检测接收机在非理想环境下，BER 为 10^{-4} 的最小接收电平。同样，如果 DUT 支持有扰发射 (Dirty Transmitter)，综合测试仪必须仿真这一环境。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频
- 2) DUT 置为环回 (Loop Back) 模式，且白噪声打开
- 3) 发射分组类型：2-DH5 或 3-DH5
- 4) 发射有效载荷：PRBS9
- 5) 是否为最大功率：是
- 6) 综合测试仪发射功率：-70dBm
- 7) 是否有扰发射：根据 DUT 是否支持决定

3. 测量步骤

- 1) DUT 分别工作在低、中、高三个频点，回送调制信号为 PRBS9 的 2-DH5 或 3-DH5 分组。依照蓝牙规范的要求，测试仪控制其输出功率，以使 DUT 的收信功率为-70dBm；
- 2) 将干扰加入到发送的蓝牙信号中，每 20ms 一组，从第一组依次到第十组，再返回第一组，不断重复；
- 3) 使用综合测试仪的相关功能统计误码率。

4. 合格指标

误码率 $BER \leq 7 \times 10^{-6}$ (要求测试包的长度不少于 8,000,000 比特)

误码率 $BER \leq 10^{-5}$ (要求测试包的长度不少于 160,000,000 比特)

3.3.7 EDR 误码率平坦性能

1. 测量目的

检测接收机在非理想环境下，BER 为 10^{-5} 的最小接收电平。

2. 综合测试仪设置

- 1) 链路为非跳频
- 2) DUT 置为环回 (Loop Back) 模式，且白噪声打开
- 3) 发射分组类型：2-DH5 或 3-DH5
- 4) 发射有效载荷：PRBS9
- 5) 是否为最大功率：是
- 6) 综合测试仪发射功率：-60dBm
- 7) 是否有扰发射：根据 DUT 是否支持决定

3. 测量步骤

- 4) DUT 分别工作在低、中、高三个频点，回送调制信号为 PRBS9 的 2-DH5 或 3-DH5 分组。依照蓝牙规范的要求，测试仪控制其输出功率，以使 DUT 的收信功率为-60dBm；
- 5) 将干扰加入到发送的蓝牙信号中，每 20ms 一组，从第一组依次到第十组，再返回第一组，不断重复；

6) 使用综合测试仪的相关功能统计误码率。

4. 合格指标

误码率 $BER \leq 7 \times 10^{-6}$ (要求测试包的长度不少于 8,000,000 比特)

误码率 $BER \leq 10^{-5}$ (要求测试包的长度不少于 160,000,000 比特)

3.3.8 EDR 最大输入电平

1. 测量目的

检测接收机抵抗大信号的能力。

该项测试和灵敏度意义不同在于测试的是大信号，综合测试仪发送-20dBm 的信号，检测接收机的误码率。

2. 综合测试仪设置

- a) 链路为非跳频
- b) DUT 置为环回 (Loop Back) 模式
- c) 发射分组类型：支持的最大数据包
- d) 发射有效载荷：PRBS9
- e) 是否为最大功率：是
- f) 综合测试仪发射功率：-20dBm

3. 测量步骤

- 7) DUT 分别工作在低、中、高三个频点，回送调制信号为 PRBS9 的 DH1 分组。依照蓝牙规范的要求，测试仪控制其输出功率，以使 DUT 的收信功率为-20dBm；
- 8) 将干扰加入到发送的蓝牙信号中，每 20ms 一组，从第一组依次到第十组，再返回第一组，不断重复；
- 9) 使用综合测试仪的相关功能统计误码率。

4. 合格指标

误码率 $BER \leq 0.1\%$ (要求测试包的长度不少于 1,600,000 比特)

3.4 参考文献

- [1] 马建仓. 蓝牙核心技术及应用[M]. 科学出版社, 2003.
- [2] 陈建光. 蓝牙的射频指标及检测方法[J]. 中国无线电, 2009(5):46-47.
- [3] Bluetooth™ Qualification Procedure White Paper.
- [4] Bluetooth Test Specification v1.2/2.0/2.0 + EDR/2.1/2.1 + EDR/3.0/3.0 + HS/4.0.
- [5] Specification of the Bluetooth System, Core System Package, Volume 2, Part A.
- [6] Specification of the Bluetooth System, Core System Package, Volume 3, Part D.

第三章 远程实验开关控制系统

本章**项目介绍**主要介绍远程实验开关控制系统的主要目标和应用价值，**项目流程**详细分析了实现系统的主要步骤，并对系统具体的模块组成及各模块的主要功能进行介绍，**软件控制**则具体讲解如何通过电脑软件远程控制实际电路、实现需要的功能，最后**系统举例**以某一具体的电路实现代码控制，并进行详细的解释。

1 项目介绍

RIGOL 公司的诸多电子测量设备，包括频谱分析仪、函数信号发生器、示波器、数据采集/开关控制系统等，都提供了远程控制的相关软件或编程功能。当电脑与这些测量设备连接后，通过软件或者指令代码即可实现远程的控制操作，对设备的状态进行修改、更新等操作。

本项目的主要目标是利用 M300 的是开关功能，通过控制开关的闭合与断开，控制支路的通断和电路的不同功能，其应用价值在于为高校跨校区远程实验或者创客、企业的远程操作提供平台，使各类实验室能够按照企业设计、研发和生产实际工作组织实验课程。

2 项目流程

远程实验开关控制系统综合软件与硬件，需要根据实验需求，利用尽可能少的资源，实现实际可用的实验控制系统。本项目的流程图如图 7 所示：

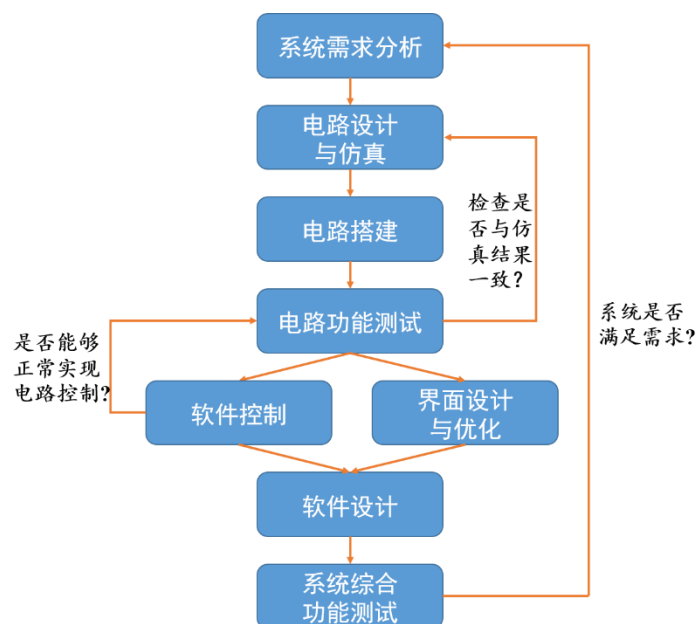


图 9 远程实验开关控制系统设计流程

系统需求分析 远程实验开关控制系统主要针对与电子电路的相关实验，对于特定的系统，只能实现预先设计好的电路的功能。因而对于远程实验开关控制系统，首先需要确定该系统的电路的功能是什么？比如三极管输出特性曲线的测量、MOS 管转移特性曲线的测量等。

电路设计与仿真 确定了系统的功能需求，即可设计得到相应的电路，并且通过仿真得到电路预期的测量结果。在电路设计时，需要选择合适的数据采集/开关系统模块,比如多路复用器、矩阵开关等，并考虑如何使用尽可能少的开关实现需要的功能，从而节省开关资源。另外，为了使得输出的测量结果有明显的变化，还可以通过仿真得到合适的电阻、电容等参数值。

电路搭建 在面包板上，根据设计好的电路图，进行电路的硬件搭建。

电路功能测试 对于搭建好的电路，需要先手动控制数据采集/开关系统的开关，查看某些测量点的结果，检查是否与仿真结果一致，从而测试对应的功能是否正常。

软件设计 电路功能测试完成之后，即可进行软件的设计。使用 MATLAB，先根据设计好的电路图进行用户图形界面的设计，包括在合适的位置增加开关按键，再将按键与开关的闭合/断开功能相结合即可。运行设计好的软件，查看是否能够实现电路控制的功能。

系统综合功能测试 对于设计好的软件与硬件，最后还需要回归最初的系统设计需求，从而保证设计的远程实验开关控制系统能够满足原始的功能需求。

本项目是小组合作项目，本人主要负责软件控制与界面优化部分的工作。后文对本人部分的工作进行详细介绍。

3 软件设计

本项目的主要设备是 RIGOL 公司的 M300 数据采集/开关控制系统。M300 数据采集/开关系统提供 5 个槽位，支持多种多路复用器(Multiplexer)、矩阵开关(Matrix Switch)以及多功能模块等共 8 种插入式模块。模块化结构的 M300 可将精密的测量功能与灵活的信号连接功能相结合。

M300 支持远程控制功能，这是本项目的核心内容。后文将详细介绍如何与 M300 建立远程通信、控制 M300 常用的指令等，并对界面的按键进行相应的设置。

3.1 建立远程通信

可以通过 USB、LAN、 GPIB(IEEE-488)等接口建立 M300 与计算机之间的远程通信。主要操作步骤：

安装 Ultra Sigma 通用 PC 软件

登陆 RIGOL 官方网站(www.rigol.com)下载 Ultra Sigma 通用 PC 软件并按照指导进行安装。

连接并配置仪器的接口参数

以 USB 连接方式为例, 使用 USB 数据线连接 M300 后面板 USB Device 接口和计算机的 USB Host 接口。

验证连接是否成功

运行 Ultra Sigma, 搜索资源并右击资源名称, 在弹出的菜单中选择“SCPI Panel Control”。在弹出的 SCPI 控制面板中输入正确的命令并点击 Send Command、Read Response 或者 Send & Read 以验证连接是否成功, 如下图所示(以 USB 接口为例)。

如下图所示, M300 连接到计算机之后, 计算机能够获取到 M300 设备的资源描述符, 在后面的软件控制中需要利用这一资源描述符。

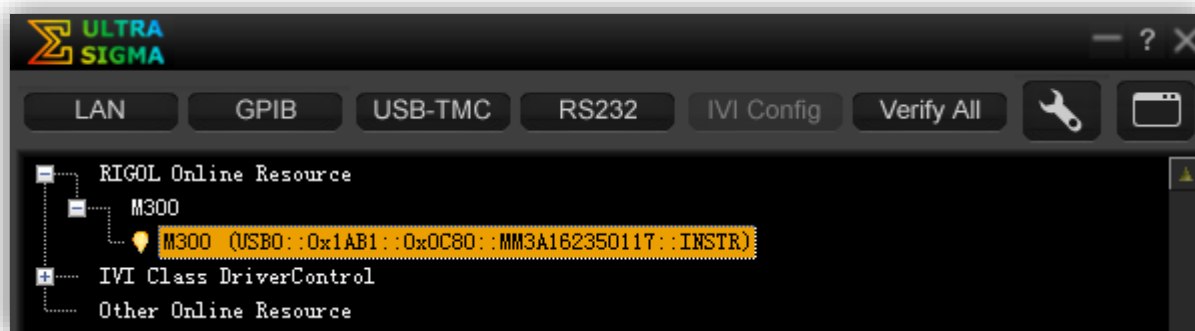


图 10 使用 Ultra Sigma 软件进行连接测试

3.2 常用控制指令

指令格式	指令功能
*IDN?	获取当前设备的 ID 字符串
ROUTe:CLOSE (@<ch_list>)	闭合指定通道的开关
ROUTe:CLOSe:EXCLusive (@<ch_list>)	断开所有通道之后闭合指定的开关
ROUTe:OPEN (@<ch_list>)	断开指定通道的开关
ROUTe:DONE?	查询继电器的上一操作是否完成

表 2 系统的核心指令

上表给出了本项目中核心的控制指令, 这只是 M300 数据采集/开关系统的指令集中非常小的一部分, 但对于远程实验开关控制系统已经足够。

3.2.1 *IDN?

- 功能：查询仪器的 ID 字符串（包含厂商的名称、型号和版本号）。
- 返回值：返回 RIGOL TECHNOLOGIES,M300,<serial number>,XX.XX.XX.XX.XX.XX
其中，<serial number>为仪器的序列号，XX.XX.XX.XX.XX.XX 为仪器的软件版本号。
- 举例：

输入：*IDN?

返回：RIGOL TECHNOLOGIES,M300,M300123123123,07.08.00.01.00.00.17

3.2.2 ROUTe:CLOSe (@<ch_list>)

- 简写：ROUT:CLOS (@<ch_list>)
- 功能：闭合复用器、执行器或者矩阵开关的指定通道 ch_list
- 参数：ch_list，表示通道列表
- 举例：

命令：ROUT:CLOS (@101)

功能：闭合插槽 1 所插模块的通道 1

3.2.3 ROUTe:CLOSe:EXCLusive (@<ch_list>)

- 简写：ROUT:CLOS:EXCL (@<ch_list>)
- 功能：断开多路复用器，执行器或者矩阵开关的所有通道之后，闭合指定的通道 ch_list。
- 参数：ch_list，表示通道列表
- 举例：

命令：ROUT:CLOS:EXCL (@101)

功能：断开插槽 1 所插模块全部通道之后，闭合插槽 1 所插模块的通道 1

3.2.4 ROUTe:OPEN (@<ch_list>)

- 简写：ROUT:OPEN (@<ch_list>)
- 功能：断开复用器、执行器或者矩阵开关的指定通道 ch_list
- 参数：ch_list，表示通道列表
- 举例：

命令：ROUT:OPEN (@101)

功能：断开插槽 1 所插模块的通道 1

3.2.5 ROUTe:DONE?

- 功能：查询继电器操作是否已经完成(闭合或断开)
- 返回值：1 表示继电器操作已经完成；0 表示继电器操作尚未完成。

➤ 举例：

```

输入：  ROUT:CLOS (@201:203)
        ROUT:DONE?
返回： 1

```

3.3 界面按键控制

使用 MATLAB 对 M300 进行控制时，需要先创建 VISA 变量。

```

M300 = visa( 'NI','USB0::0x1AB1::0x0C80::MM3A162350117::INSTR' );
%创建VISA对象。
%'ni'为销售商参数，可以为agilent、NI或tek
%'USB0::0x1AB1::0x04B1::DS4A0000000001::INSTR'为设备的资源描述符

```

在 MATLAB 设计图形用户界面(GUI)时，按钮用于控制开关的闭合或断开。当按钮被点击变为黑色时，表示对应的开关闭合；当按钮被点击变为白色时，表示对应的开关断开。通过这样实现对电路中测量点、电阻参数的控制。

代码的一般格式如下，说明请见注释。

```

global M300; % M300的VISA变量
if get(handles.radiobutton3,'value') %如果点击按钮3
    fopen(M300); % 打开M300的VISA变量
    fprintf(M300,'ROUT:CLOS (@112)'); % 传送命令： 闭合插槽1的第12个通道开关
    fclose(M300); % 关闭M300的VISA变量
else
    fopen(M300); % 打开M300的VISA变量
    fprintf(M300,'ROUT:OPEN (@112)'); % 传送命令： 断开插槽1的第12个通道开关
    fclose(M300); % 关闭M300的VISA变量
end

```

3.4 软件设计示例

3.4.1 系统目标

对于电阻可选的二极管电路，不仅需要实现对信号源和示波器通道的开关控制，还要实现电路中电阻阻值的选择。

本实验的电路图如图所示，开关 S1 用于选择系列 1 的电阻阻值，开关 S2 用于选择系列 2 的电阻阻值。

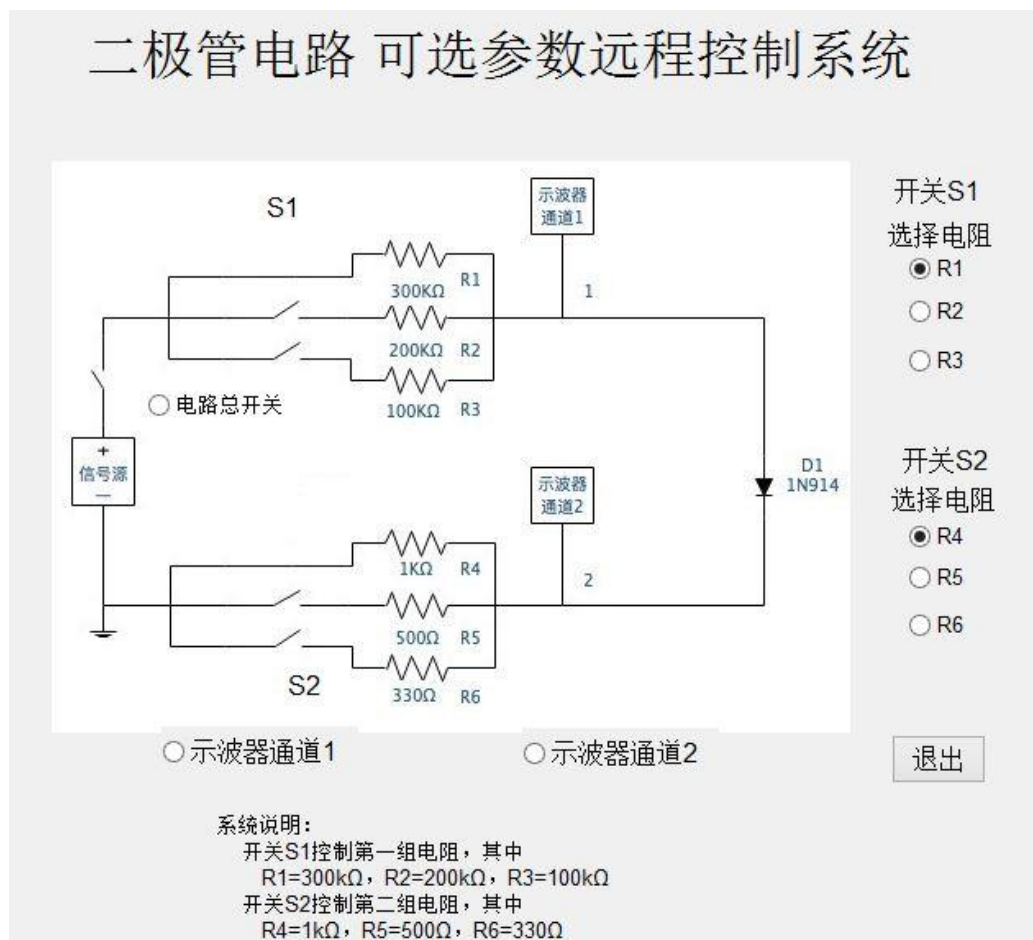


图 11 举例：参数可选择的二极管电路

3.4.2 代码功能实现

1. 连接 M300，加载电路图及初始状态

```
global M300; % 设置全局变量
M300 = visa('NI','USB0::0x1AB1::0x0C80::MM3A162350117::INSTR');
M300.InputBufferSize = 2048;
```

```
% 打开界面初始化，加载电路图
axes(handles.axes1);
image=imread('diode.jpeg'); % 加载二极管图
imshow(image);
image=imread('line.jpeg'); % 实现开关动态变化
axes(handles.axes2);imshow(image);
image=imread('line.jpeg');
```

```

axes(handles.axes5);imshow(image);
% 设置初始电阻为两个最大的电阻
set(handles.S1up,'value',1); % 初始状态设置, S1开关选择最大的电阻
set(handles.S2up,'value',1); % 初始状态设置, S2开关选择最大的电阻

```

2. 电路总开关的控制

```

% 用于控制信号源是否接入电路
global M300; % M300的全局VISA变量
if get(handles.S,'value') % 点击闭合开关
    image=imread('line1.jpeg');
    axes(handles.axes8);
    imshow(image);
    % 闭合相应的开关, 电路总电源接通
    fopen(M300);
    fprintf(M300, 'ROUT:CLOS (@211)');
    fclose(M300);
else
    image=imread('S1.jpeg');
    axes(handles.axes8);
    imshow(image);
    % 断开相应的开关, 电路不通
    fopen(M300);
    fprintf(M300, 'ROUT:OPEN (@211)');
    fclose(M300);
end

```

3. 示波器测量的控制(以通道 1 为例)

```

M300 = visa( 'NI','USB0::0x1AB1::0x0C80::MM3A162350117::INSTR' ); % VISA变量
% 控制开关的闭合与断开
if get(handles.radiobutton1,'value')
    fopen(M300);
    fprintf(M300, 'ROUT:CLOS (@222)');
    fclose(M300);
else
    fopen(M300);
    fprintf(M300, 'ROUT:OPEN (@222)');
    fclose(M300);
end

```

4. 不同电阻的选择(以第一组最大电阻为例)

在选择电阻时，需要注意：电路要求同一组的电阻在某一时刻只能接入一个电阻，因而需要对按键进行相应的排斥操作。所谓排斥，就是任意时刻同一组内有且仅有一个电阻能够接入电路。在控制时，当按下按键闭合其中一个电阻所在支路的开关时，其他电阻支路的开关全部需要断开，而且界面上的按键除了刚按下的按键，其他按键都应该处于白色的未点击状态。

```
global M300; % 全局VISA变量
if get(handles.S1up,'value') % 如果点击闭合最大电阻支路的开关
    set(handles.S1m,'value',0); % 另外两个电阻支路开关需要断开
    set(handles.S1down,'value',0); % 另外两个电阻支路开关需要断开
    image=imread('S.jpeg');
    axes(handles.axes3);imshow(image);
    axes(handles.axes4);imshow(image);
    image=imread('line.jpeg');
    axes(handles.axes2);imshow(image);
    fopen(M300);
    fprintf(M300,'ROUT:OPEN (@105:106)'); % 断开其他开关
    fclose(M300);
else
    msgbox('无法取消！三个电阻中请至少选择1个电阻'); % 至少选择一个电阻
    set(handles.S1up,'value',1);
    fopen(M300);
    fprintf(M300,'ROUT:OPEN (@105:106)'); % 断开其他开关
    fclose(M300);
end
```

5. 退出系统

```
% 退出系统，断开所有开关
global M300;
fopen(M300);
fprintf(M300,'ROUT:OPEN (@211,221,222,233,234)'); % 断开电路开关
fclose(M300);
clear all;close all;clc; % 清楚所有，并退出界面
close(gcf);
```

对于一个完整的远程实验开关控制系统，以上即为软件控制方面需要的核心操作。

4 项目成果

本项目前后共分为三个阶段，设计的系统难度由易到难。表 3 展示了三个阶段的全部成果。

实验阶段	系统包含电路	系统功能
第一阶段 初步尝试	RC 电路	开关控制示波器测量点的切换
第二阶段 进一步练习	二极管电路	开关控制示波器测量点的切换
	多参数选择 RC 振荡电路	测量点切换，电阻和电容的选择
	多参数选择二极管电路	测量点切换，电阻的选择
第三阶段 综合实验系 统设计	一阶有源低通滤波器电路	多个实验电路的选择与切换，各电路内元件参数值的改变和测量点的切换
	晶体三极管可选参数	
	功率放大器电路	
	三极管输出特性曲线测量电路	
	MOS 管转移特性曲线测量电路	

表 3 远程实验开关控制系统项目成果

第四章 实习项目总结

本人在清华大学天津电子信息研究院(以下简称“天津电子院”)进行了生产实习。本次实习项目依托于天津电子院,同时与国内顶尖的电子测量仪器公司——北京普源精电科技有限公司(RIGOL)合作,具体实习项目由 RIGOL 公司提供。实习内容原定与智能家居相关,但后期实习项目调整为蓝牙射频测量方案和远程实验开关控制系统。

通过本次实习,本人在前期的调研中整理分析项目背景与应用价值,为具体实习项目的开展提供导向作用;在蓝牙射频测量方案设计项目中,学习蓝牙无线通信技术的基础工作原理,分析蓝牙信号的测量需求,利用频谱分析仪等设备完成蓝牙信号的射频测量方案。

“纸上得来终觉浅,绝知此事要躬行”。远程实验开关控制系统设计更注重实际操作的能力,利用 RIGOL 公司提供的数据采集/开关系统,搭建并编辑能够根据实验要求进行远程自动切换的开关控制系统,体会了使用通信进行远程控制的基本理念与技术方法。

为期六周的实习中,本人不仅丰富了蓝牙方面的理论知识,还系统性的总结了自己的第一份测量方案,另外,在远程实验开关控制项目中的软件设计部分,锻炼了自己的编程水平和团队项目工作能力。

本次实习的顺利开展,离不开来自各方面的帮助。感谢天津电子院的刘畅工程师, RIGOL 的武立春和兰晓龙工程师,三位工程师在本次实习中对本人提供了很大的指导与帮助。感谢一起完成远程实验开关控制系统项目的卢致远、蒙治伸、贾子谦同学,使得我在项目中提高了自己的团队精神与合作能力。同时还要感谢电子系和天津电子院中提供帮助的有关人员。再次对相关的老师、工程师、同学们表示真诚的感谢!

无 47 班 刘前
2017 年 8 月 10 日