

# 一种微波附件组合的设计与实现

刘恩凡

(空军装备部驻北京地区第二军事代表室, 北京 100074)

**摘要:** 在综合测试与诊断领域, 随着被测系统复杂性的提高, 对测试系统准确度要求进一步提高; 文中设计实现了一种微波附件组合, 主要由微波开关、衰减器、功率放大器和电源组成; 该设备实现了各项技术指标要求, 其中微波开关的驻波比在 DC-1 GHz 时不大于 1.3, 在 1~18 GHz 时不大于 1.5; 衰减器的衰减量是 40 dB, 精度是  $\pm 3.5$  dB, 驻波比不大于 1.6; 功率放大器的频率范围在 0.9 GHz~1.3 GHz 范围之内, 输出功率不小于 5 W; 该微波附件组合结合信号源、频谱仪、功率计及各类模拟器等射频仪器资源来实现射频测量通道的资源扩展、大功率信号的衰减调理、微波功率合成等功能; 以满足被测试对象飞机系统中的微波射频系统、部件等微波信号性能测试的测试需求。

**关键词:** 微波附件组合; 衰减器; 射频

## Design and Implementation of a Microwave Accessory Combination

Liu Enfan

(Second Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing 100074, China)

**Abstract:** In the field of comprehensive test and diagnosis, with the improvement of the complexity of the tested system, the accuracy of the test system is required to be further improved. In this paper, a combination of microwave accessories is designed and implemented, which is mainly composed of microwave switch, attenuator, power amplifier and power supply. The equipment has achieved various technical requirements, among which the standing wave ratio of microwave switch is not more than 1.3 at dc-1 GHz and 1.5 at 1 GHz-18 GHz; the attenuation of attenuator is 40 dB, the accuracy is  $\pm 3.5$  db, the standing wave ratio is not more than 1.6; the frequency range of power amplifier is 0.9 GHz-1.3 GHz, and the output power is not less than 5 W. The combination of microwave accessories and RF instrument resources such as signal source, spectrometer, power meter and various simulators can realize the resource expansion of RF measurement channel, attenuation and conditioning of high-power signal, microwave power synthesis and other functions. In order to meet the test requirements of microwave RF system, components and other microwave signal performance test in the tested aircraft system.

**Keywords:** microwave accessory assembly; attenuator; RF

## 0 引言

微波附件组合的设计目的是用于配套某型通用自动测试平台, 结合平台中的信号源、频谱仪、功率计及各类模拟器等射频仪器资源来实现射频测量通道的资源扩展、大功率信号的衰减调理、微波功率合成等功能, 以满足被测试对象飞机系统中的微波射频系统、部件等微波信号性能测试的测试需求。

微波附件组合具体功能要求如下:

1) 组合内部设置微波开关, 程控方式实现多路独立的射频通道间的切换, 便于射频通道的扩展, 同时可实现 1~100 dB 功率范围 1 dB 步进的功率衰减;

2) 实现测试中射频信号输出功率的固定或步进式衰减调理, 改善激励源和负载间的功率匹配功能;

3) 对被测件输出射频端口提供大功率负载, 在大功率放大器或者发射机的测量中, 负载可以用来代替天线将载频功率全部吸收, 减少辐射影响;

4) 如果被测对象 UUT 是接收机, 通过定向器的耦合端可以向接收机注入一个邻道干扰信号, 再通过接在定向耦合器的直通端的综合测试仪来测试接收机抗干扰性能; 如果被测对象 UUT 是发射机, 通过定向器的耦合端接测试仪或频谱仪可以用于信号取样和监测; 放大器互调测试时, 耦合器可以用于两路功率信号的合成, 作为互调测量的功率源。

## 1 微波附件组合工作原理及总体设计方案

### 1.1 功能概述

微波附件组合由机箱、电源及滤波器, 微波控制板及同轴电缆、液晶显示屏、同轴电缆、面板转接器及供电与通信接口等部分组成。通过优化配置和设计, 结合平台中的信号源、频谱仪、功率计及各类模拟器等射频仪器资源来实现射频测量通道的资源扩展、大功率信号的衰减调理、微波功率合成等功能, 以满足被测试对象中的微波射频系统、部件等微波信号性能测试的测试需求。

### 1.2 总体方案设计

微波附件组合实物如图 1 所示, 微波附件组合由机箱内器件(耦合器、功率放大器、可编程衰减器、负载、环行器、检波器、开关)、电源模块/开关/功放/可编程衰减器控制模块、液晶显示模块、同轴电缆、面板转接器、电

收稿日期: 2019-11-18; 修回日期: 2019-12-05。

作者简介: 刘恩凡(1974-), 男, 河南舞阳人, 硕士, 主要从事机载弹药及保障装备研制管理工作方向的研究。

源滤波模块、开关箱结构件等部分组成。



图 1 微波附件组合实物图

### 1.3 工作原理

由以太网接口传输的微波附件控制数据（按照既定的通讯协议），通过网口电路进行数据解析，再由微处理器发送控制数据。微处理器除完成网口通讯外，还将完成开关的逻辑控制功能。驱动电路将微处理器输出的开关控制信号转化为合适的电压和驱动电流，进行开关和可编程衰减器和功率放大器的控制，实现需要的信号回路。电源模块将外界输入的 220 V 电源通过 AC-DC 变换成可满足开关电路、控制电路工作需求的电平和电流。工作原理如图 2 所示。

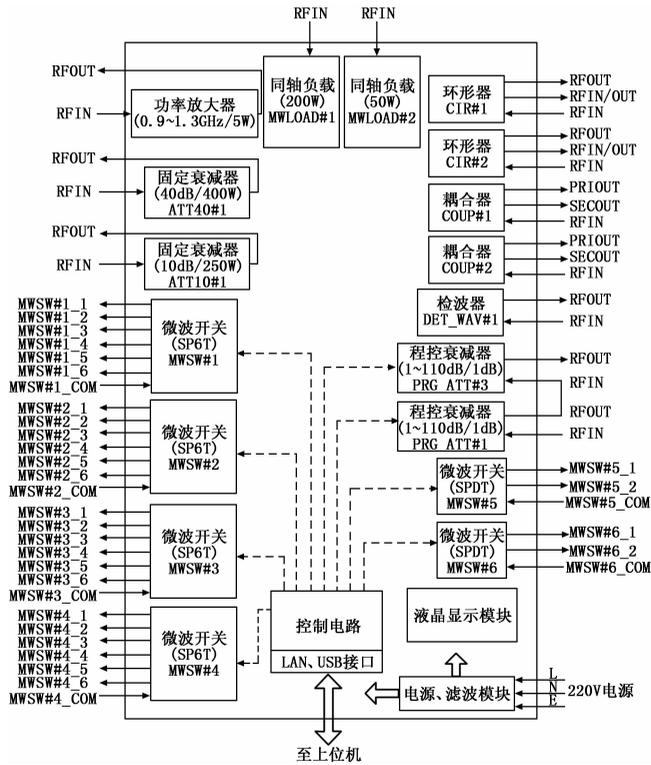


图 2 微波附件组合原理图

微波附件组合主要组成如表 1 所示。

## 2 微波附件组合的硬件设计

### 2.1 微波附件组合控制电路

微波附件组合控制电路主要由核心控制板、继电器控制板、液晶显示屏、电源转化电路等组成。在以 X86 架构的核心板上运行 WINDOWS 操作系统，同时备有液晶显示屏实时显示操作控制功能，在核心板上安装 MicroWaveApp\_V1.04 软件控制，从核心板上通过 LAN 口发送控制信号，

表 1 微波附件组合组成单元

组成单元	技术参数
机箱	5U 结构
SPDT 微波开关	DC~18GHz 单刀双掷
SP6T 微波开关	DC~18GHz 单刀六掷,带负载
同轴固定衰减器 1	DC-18G,40dB,250W
同轴固定衰减器 2	DC-18G,10dB,250W
程控衰减器	DC-5G,100dB/1dB
功率放大器	0.9-1.3GHz,5W

从而输出不同电压电流给被控制器件开关/功放/可编程衰减器，从而实现外部想要的不同信号组合。核心控制板原理如图 3 所示。

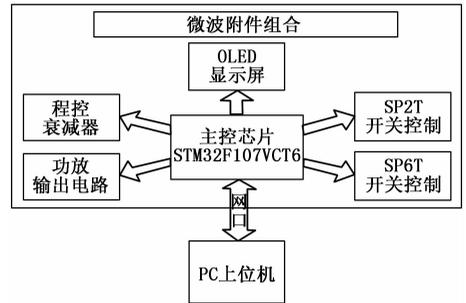


图 3 核心控制板原理框图

控制板设计主要包括主处理 ARM 及外围电路，控制电路模块，电源及电压监控模块，各个连接器及接口模块。处理器需提供丰富的外部接口可以与 PC 通信，从而被灵活的控制应用。另外需有丰富的 I/O 控制接口，可以通过控制电路对箱内有源器件进行状态切换。屏幕显示功能则作为人性化设计，可以方便的观测各个器件的工作状态。电源模块可最大程度上提供 200 W 功耗，5 V，12 V，15 V，28 V 四种电压输出，其中 5 V 电压可以控制其他路电源工作状态，采用智能散热。接口模块则不仅可以提供前面板丰富的接口，还包括与其他设备做通信控制的 100 M 网口，和 USB 灵活使用。

### 2.2 微波附件组合射频通道

微波附件组合系统射频性能指标的实现主要通过核心器件一同轴线缆、面板转接器的微波性能及其级联方式决定。微波附件组合内部射频同轴电缆安装结构紧张，功率要求不高的器件采用半钢 086 线缆。线缆结构和材料如图 4 所示。

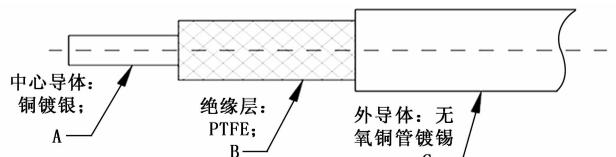


图 4 半刚线缆结构和材料

对功率要求高，弯折多结构受限的器件，我们采用了应力更低的柔性线缆如图 5。

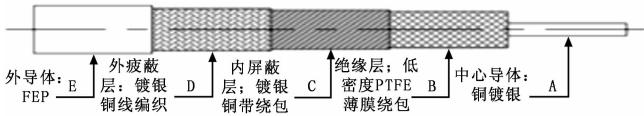


图 5 柔性线缆结构和材料

为保证尽量贴近各个器件微波性能要求，研制过程分为几个研制阶段，来不断接近并满足系统性能指标要求。

为保证实现微波附件组合各通道的微波性能要求，现各通道进行线缆配套设计。

### 2.2.1 SP6T 微波开关

SP6T 因为六个输出接口直接太近了，需要匹配线缆挤出机箱结构方便客户连接。此处要求外加线缆的插损尽量低，因此采用了能承载 18G/25 W 的柔性线缆，同时保证足够低的插损（18G 尽量保证在 0.8 dB 以内），驻波尽量低于 1.6（18G）。面板转接器配置的是低损 SMA-SMA 的四孔法兰转接器。因为此处的指标要求比较高，集成测试中通过反复更换线缆和连接器达到贴近 SP6T 微波开关器件本身驻波和插损指标的目的。

### 2.2.2 SPDT 微波开关

SPDT 因为 COM 口和两个通道之间的具体非常近，没法同时直接连接 SMA 头线缆。因此依然需要外配线缆。此处要求外加线缆的插损尽量低，因此采用了能承载 18 G/25 W 的柔性线缆，同时保证足够低的插损（18 G 尽量保证在 0.8 dB 以内），驻波尽量低于 1.5（18 G）。面板转接器配置的是低损 SMA-SMA 的四孔法兰转接器。因为此处的指标要求比较高，集成测试中通过反复更换线缆和连接器达到贴近 SPDT 微波开关器件本身驻波和插损指标的目的。

### 2.2.3 同轴固定衰减器

同轴固定衰减器因为实际功率到了 18 G/250 W，所以需要选型能承载高功率的线缆，同样因为对衰减精度有要求，线缆的插损也是要求比较严格的。最后此处选择了大功率线缆，保证驻波低于 1.4（18 G）。同时因为大功率衰减器布置在机箱尾部，线缆走线较长，因此插损大概只能保证低于 2.0 dB。考虑输入高功率的要求已经超过了 SMA 的承载范围，输入端面板转接器配的是高功率的 N-N 的四孔法兰转接器。但是为了节省空间，因为输出端的功率比较小，输出端配的是 N-SMA 的四孔法兰转接器。因为此处的指标要求比较高，器件本身衰减误差就比较大，集成测试中通过反复更换线缆和连接器达到贴近固定衰减器本身衰减精度的目的。

### 2.2.4 程控衰减器

程控衰减器因为设计位置比较靠近前面板，而且功率比较低，所以线缆可以采用低损耗低功率的柔性线缆。此处考虑的主要指标保证衰减精度和驻波比，线缆大概满足驻波比 5 G 内低于 1.3，插损低于 1.0 dB 即可。面板转接器也用的是低损的 N-SMA 的四孔法兰转接器。

### 2.2.5 功率放大器

功率放大器因为是脉冲功放，而且输出功率最大只有 5

W。所以此处选择了低频柔性线缆。柔性线缆保证驻波比低于 1.2（1.3 G），插损低于 1.2 dB（1.3 G）。而且功放原厂没有带散热片，在机箱中前部的结构上为功放设计了散热片结构。相对应的面板连接器选择了低损 N-SMA。

## 3 微波附件组合的软件设计

### 3.1 操作界面

微波附件组合具备程控和本地两种控制方式。程控通讯方式 TCP/IP（IP：192.168.0.000）。如图 6 微波附件组合控制界面所示，采用直观式设计，根据控制器件的端口数设置按钮。

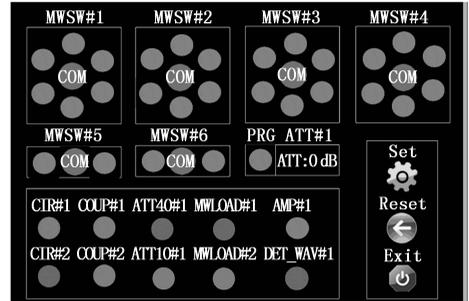


图 6 微波附件组合控制界面

默认启动时所有控制按钮均为灰色。提前需要服务器和控制板建立 LAN 口通信。设置服务器地址为“192.168.0.000”，选择面板上面的 Set 按钮，连接服务器和控制板，连接成功后即可从 MicroWaveApp\_V1.04.exe 图形界面上控制被控器件了。

MWSW #1~ MWSW #4 为四组 SP6T 微波开关，当选定的 SP6T 工作时，相应开关的 COM 端口和通道端口变为绿色按钮，不选通的通道显示红色按钮；MWSW #5 和 MWSW #6 为两组 SPDT 微波开关，当选定的 SPDT 工作时，相应开关的 COM 端口和通道端口变为绿色按钮，不选通的通道显示红色按钮；PRG\_ATT #1 为程控衰减器，选定其工作时，显示 ON 绿色按钮和衰减量，不工作时显示 OFF 红色按钮；ATT40 #1 和 ATT10 #1 为固定衰减器，MWLOAD #1 和 MWLOAD #2 为同轴负载，COUP #1 和 COUP #2 为耦合器，DET\_WAV #1 为检波器，CIR #1 和 CIR #2 为环形器，AMP #1 为功率放大器，当选定这些器件工作时，显示 ON 绿色按钮和衰减量，不工作时显示 OFF 红色按钮。

为使用安全和方便，如果想重置所有设置的话，直接点击“Reset”按钮，所有控制器件就会恢复初始默认状态，比如 SPDT 开关直接切到常开端 2 口，SP6T 所有通道断开，可编程衰减器衰减量设置为 0，功放关断不放大。

### 3.2 控制命令说明

开关矩阵上、下行通道中各微波开关各通道导通的控制协议如下：

格式	命令字(1字节)	数据区(N字节)
----	----------	----------

### 3.2.1 命令字 0x01:

- 1) 说明：控制多路继电器及功放开关。
- 2) 数据区长度：4 字节。
- 3) 数据区说明：每一位代表一路继电器通断。

(1) 第 0 位控制 SP6T1\_1 通断，1 为接通，0 为断开。  
(每个字节当中，0 位为 8bit 的低位)。

(2) 第 1 位控制 SP6T1\_2 通断，以此类推，第 23 位控制 SP6T4\_6 通断。

(3) 第 24、25 位控制 SP2T\_1 通断，(24 位为 1、25 位为 0 代表接通，24 位为 0、25 位为 1 代表断开)。

(4) 第 26、27 位控制 SP2T\_2 通断，(26 位为 1、27 位为 0 代表接通，26 位为 0、27 位为 1 代表断开)。

- (5) 第 28 位控制功放开关。

### 3.2.2 命令字 0x02:

- 1) 说明：设置程控衰减器输出 DB 数值。
- 2) 数据区长度：1 字节。
- 3) 数据区说明：该值应小于等于 103。

### 3.2.3 命令字 0x03:

- 1) 说明：设置 ARM 的 IP 和端口号。
- 2) 数据区长度：6 字节。
- 3) 数据区说明：

(1) 数据区前四个字节为 IP 地址。例如：172.16.1.24 为 AC 10 01 18。直接以 . 为分隔，每个数字单独转十六进制。

(2) 后两个字节为端口号，存储模式为大端模式。

(3) 例如：设置 ARM 地址为 172.16.1.24；8080，发送的数据为 03 AC 10 01 18 90 1F。最后的 8080 是直接数字转成的 1F90，反过来写就是 901F。

## 4 微波附件组合的故障分析与排故

在微波附件组合使用期间可能出现的故障分析和简要处理如下。

### 4.1 风扇故障

如果机箱加电后尾部三个风扇不转，需检查后面板的“0/1”按钮是否拨到 1，前面板开关按钮是否已经按亮，如果都满足但是风扇还不转，可能是风扇供电线断了，需要返修。

### 4.2 显示屏故障

机箱加电启动后，无论有没有控制信号输入，前面板的显示屏就应该高亮显示每个被控器件的状态。如果机箱确认加电，控制板的绿灯亮而显示屏无显示，需要检查显示屏到控制板的接线是否正确插入。如果已经控制板的接线正确插入后显示屏依然无显示，需要返修。

### 4.3 可编程衰减器切换衰减量故障

机箱加电启动后，可编程衰减器从控制软件无法正常切换衰减量：

确认当前的服务器和控制板的 IP，保证 LAN 口通信状态正常。

如果通信状态正常，控制软件面板操作切换命令后可编程衰减器依然无法正常切换衰减量。检查可编程衰减器

和控制板的连线接口有没有松动。

如果连线接口依然没有松动，可以启动网络调试助手等工具，控制命令直接输入底层命令让可编程衰减器切换衰减量，如果可以听到正常的开关切换声，则控制软件故障。如果还是衰减量还是不能切换，则控制板故障，需返修。

同理，如果可编程衰减器控制外部程序出现问题，也可以用控制软件来排除故障。

### 4.4 功率放大器故障

机箱加电启动后，功率放大器不工作。

首先断掉输入信号，确认当前的输入信号满足：5%~90%的方波，0.9~1.3 GHz。输出信号加合适负载或者外部通路（不空置）。

检查功率放大器和控制板的连线接口有没有松动，功率放大器和前面板连接线缆有没有松动。

如果控制线和射频连接线的连线接口都没有松动，功放还是不能正常工作，则控制板故障，需返修。

## 5 微波附件组合的实验结果与分析

微波附件组合性能指标验收按照表 2 进行测试。

表 2 检查试验项目

序号	测试要求及方法
1	SP6T 微波开关
2	SPDT 微波开关
3	固定衰减器
4	1dB 步进衰减(程控衰减器)
5	功率放大器

### 5.1 微波开关 SP6T 性能测试

该项测试是为了验证 SP6T 微波开关 MWSW #1~MWSW #4 的微波性能是否满足指标要求。通过网络分析仪来完成插入损耗测试、隔离度测试和驻波比测试。

1) 电压驻波比测试：在网络分析仪的 S11 和 S22 测试界面分别设置两个 Marker 点自动搜索 7 kHz~1 GHz 和 1~18 GHz 两个频段内的最大值，分别读取两个频段 S11 和 S22 驻波值最大值。

2) 插入损耗测试：在 S21 测试界面设置两个 Marker 点自动搜索 7 kHz~1 GHz 和 1~18 GHz 两个频段内的最小值，分别读取两个频段内的最小值。

3) 隔离度测试：上位机 MAP 软件操作控制界面，切换到微波开关下一个端口通道，设置合适的 Scale 值，打开 Average 选项设置平均值为 30，等结果稳定后再读数。在 S21 测试界面设置两个 Marker 点自动搜索 7 kHz~1 GHz 和 1~18 GHz 两个频段内的最大值，分别读取两个频段 S21 的最大值。

4) 测试记录见表 3。

SP6T 微波开关 MWSW #1~MWSW #4 的微波性能均满足技术指标要求。

表 3 微波开关 SP6T 性能测试表

微波开关 SP6T 性能测试

通道	合格判据 (DC~1GHz)	实测 值	合格判据 (1~18 GHz)	实测 值
MWSW # 1	驻波比 $S_{11} \leq 1.3$	1.05	驻波比 $S_{11} \leq 1.5$	1.4
	插损 $ S_{21}  \leq 1.0$ dB	0.3	插损 $ S_{21}  \leq 2.0$ dB	1.9
	隔离度 $ S_{21}  \geq 75$ dB	80	隔离度 $ S_{21}  \geq 55$ dB	63
MWSW # 2	驻波比 $S_{11} \leq 1.3$	1.13	驻波比 $S_{11} \leq 1.5$	1.41
	插损 $ S_{21}  \leq 1.0$ dB	0.7	插损 $ S_{21}  \leq 2.0$ dB	1.04
	隔离度 $ S_{21}  \geq 75$ dB	77	隔离度 $ S_{21}  \geq 55$ dB	81
MWSW # 3	驻波比 $S_{11} \leq 1.3$	1.2	驻波比 $S_{11} \leq 1.5$	1.5
	插损 $ S_{21}  \leq 1.0$ dB	0.6	插损 $ S_{21}  \leq 2.0$ dB	1.9
	隔离度 $ S_{21}  \geq 75$ dB	84	隔离度 $ S_{21}  \geq 55$ dB	60
MWSW # 4	驻波比 $S_{11} \leq 1.3$	1.25	驻波比 $S_{11} \leq 1.5$	1.3
	插损 $ S_{21}  \leq 1.0$ dB	0.83	插损 $ S_{21}  \leq 2.0$ dB	1.73
	隔离度 $ S_{21}  \geq 75$ dB	84	隔离度 $ S_{21}  \geq 55$ dB	61

5.2 微波开关 SPDT 性能测试

该项测试是为了验证 SPDT 微波开关 MWSW # 5 ~ MWSW # 6 的微波性能是否满足指标要求。通过网络分析仪来完成插入损耗测试、隔离度测试和驻波比测试。

1) 电压驻波比测试：在网络分析仪的 S11 和 S22 测试界面分别设置两个 Marker 点自动搜索 7 kHz ~ 1 GHz 和 1 ~ 18 GHz 两个频段内的最大值，分别读取两个频段 S11 和 S22 驻波值最大值。

2) 插入损耗测试：在 S21 测试界面设置两个 Marker 点自动搜索 7 kHz ~ 1 GHz 和 1 ~ 18 GHz 两个频段内的最小值，分别读取两个频段内的最小值。

3) 隔离度测试：上位机 MAP 软件操作控制界面，切换到微波开关下一个端口通道，设置合适的 Scale 值，打开 Average 选项设置平均值为 30，等结果稳定后再读数。在 S21 测试界面设置两个 Marker 点自动搜索 7 kHz ~ 1 GHz 和 1 ~ 18 GHz 两个频段内的最大值，分别读取两个频段 S21 的最大值。

4) 测试记录见表 4。

表 4 微波开关 SPDT 性能测试表

微波开关 SPDT 性能测试

通道	合格判据 (DC~1GHz)	实测 值	合格判据 (1~18 GHz)	实测 值
MWSW # 5	驻波比 $S_{11} \leq 1.3$	1.1	驻波比 $S_{11} \leq 1.5$	1.47
	插损 $ S_{21}  \leq 1.0$ dB	0.3	插损 $ S_{21}  \leq 2.0$ dB	0.53
	隔离度 $ S_{21}  \geq 75$ dB	84	隔离度 $ S_{21}  \geq 55$ dB	67
MWSW # 6	驻波比 $S_{11} \leq 1.3$	1.03	驻波比 $S_{11} \leq 1.5$	1.2
	插损 $ S_{21}  \leq 1.0$ dB	0.1	插损 $ S_{21}  \leq 2.0$ dB	0.7
	隔离度 $ S_{21}  \geq 75$ dB	80	隔离度 $ S_{21}  \geq 55$ dB	60

SPDT 微波开关 MWSW # 5 ~ MWSW # 6 的微波性能均满足技术指标要求。

5.3 同轴固定衰减器微波性能测试

该项测试是为了验证微波附件组合同轴固定衰减器

ATT40 # 1 和 ATT10 # 1 的微波性能是否满足指标要求。通过矢量网络分析仪来完成衰减量和驻波比测试。

1) 驻波比测试：在驻波 S11 测试界面设置 Marker 点自动搜索 7 kHz ~ 18 GHz 频段内的最大值，读取 S11 驻波值最大值。

2) 衰减量和精度测试：测试时将矢量网络分析仪 PORT1 和 PORT2 的测试线缆分别接到 ATT40 # 1 的 RFIN 端口和 RFOUT 端口，在插损 S21 测试界面设置两个 Marker 点自动搜索 7 kHz ~ 18 GHz 频段内的最大值和最小值，分别读取并记录整个频段内 S21 最大值和最小值，并计算插损精度（即插损值  $|S_{21}|$  绝对值与 40 dB 的相对差值）。

3) 测试记录见表 5。

表 5 同轴固定衰减器性能测试表

同轴固定衰减器微波性能测试

通道	合格判据(DC~18GHz)	实测值
ATT40 # 1	驻波比 $S_{11} \leq 1.6$	1.51
	插损 $ S_{21} \text{ MAX}  - 40 \text{ dB} \leq 3.5 \text{ dB}$	38.78
	40 dB - 插损 $ S_{21} \text{ MIN}  \leq 3.5 \text{ dB}$	38.5
ATT10 # 1	驻波比 $S_{11} \leq 1.6$	1.47
	插损 $ S_{21} \text{ MAN}  - 10 \text{ dB} \leq 4.5 \text{ dB}$	13.5
	10 dB - 插损 $ S_{21} \text{ MIN}  \leq 4.5 \text{ dB}$	12.5

同轴固定衰减器 ATT40 # 1 和 ATT10 # 1 的微波性能均满足技术指标要求。

5.4 程控衰减器微波性能测试

该项测试是为了验证微波附件组合同程控衰减器 PRG \_ ATT # 1 的微波性能是否满足指标要求。通过矢量网络分析仪来完成衰减精度和驻波比。

1) 衰减量和衰减精度测试：在矢量网络分析仪上在矢量网络分析仪上分别读取 7 kHz ~ 5 GHz 整个频段内 S21 插损最大值和最小值，计算插损精度（即插损值绝对值  $|S_{21}|$  与 0 dB 的相对差值）。

2) 驻波比测试：测试时将矢量网络分析仪 PORT1 和 PORT2 的测试线缆分别接到 PRG \_ ATT # 1 的 RFIN 端口和 RFOUT 端口，在 MAP 控制显示界面上设置该通道，分别设置 PRG \_ ATT 衰减量为 0 dB、1 dB、2 dB、4 dB、8 dB。驻波 S11 测试界面设置 Marker 点自动搜索 7 kHz ~ 5 GHz 频段内的最大值。

3) 测试记录见表 6。

程控衰减器 PRG \_ ATT # 1 的微波性能满足技术指标要求。

5.5 功率放大器性能测试

该项测试是为了验证微波附件组合同功率放大器 AMP # 1 的微波性能是否满足指标要求。功率放大器最主要的指标是核查输出功率。将信号源输出连接到功率放大器上，功率放大器输出通过 30 dB 固定衰减器连接到频谱仪上。

1) 输出功率测试。将设备连接好以后，信号源测试界

表 6 程控衰减器性能测试表

程控衰减器功率放大器性能测试

通道	设置值 (dB)	合格判据(DC~5GHz)	实测值
PRG_ATT # 1	0	驻波比 $S_{11} \leq 1.6$	1.32
		插损 $ S_{21MAX}  - \text{设定值} \leq 2\text{dB}$	0.5
		设定值 - 插损 $ S_{21MIN}  - \leq 2\text{dB}$	-0.04
	1	驻波比 $S_{11} \leq 1.6$	1.32
		插损 $ S_{21MAX}  - \text{设定值} \leq 2\text{dB}$	1.3
		设定值 - 插损 $ S_{21MIN}  - \leq 2\text{dB}$	2.1
	2	驻波比 $S_{11} \leq 1.6$	1.32
		插损 $ S_{21MAX}  - \text{设定值} \leq 2\text{dB}$	1.0
		设定值 - 插损 $ S_{21MIN}  - \leq 2\text{dB}$	3
	4	驻波比 $S_{11} \leq 1.6$	1.32
		插损 $ S_{21MAX}  - \text{设定值} \leq 2\text{dB}$	2.5
		设定值 - 插损 $ S_{21MIN}  - \leq 2\text{dB}$	3
8	驻波比 $S_{11} \leq 1.6$	1.32	
	插损 $ S_{21MAX}  - \text{设定值} \leq 2\text{dB}$	8.1	
	设定值 - 插损 $ S_{21MIN}  - \leq 2\text{dB}$	7.5	

面设置输出频率 1.1 GHz，通过频谱仪测试当前衰减器和电缆通道的插损并记录。然后信号源测试界面设置，输出功率 -9 dBm，选择“Pulse ON”，然后设置“Pulse Width”为 80 μs，“Pulse Period”为 40 μs。在上位机 MAP 软件操作控制界面上设置 AMP # 1 为从 OFF 切换到 ON 状态，打开选择“RF ON”、“MOD ON”按钮输出脉冲射频功率。然后在频谱仪上读出此时的最大功放输出功率值，补上衰减器和线缆的通道插入损耗即为最终的功放输出功率。

2) 测试记录见表 7。

表 7 功率放大器性能测试表

功率放大器性能测试

通道	合格判据(0.9~1.3 GHz)	实测值
AMP # 1	输出功率： $\geq 5\text{W}$	6

功率放大器 AMP # 1 的微波性能满足技术指标要求。

## 6 结束语

本文详细介绍了微波附件组合，满足被测对象飞机系统中的微波射频系统、部件等微波信号性能测试的测试需求。微波附件组合在微波射频领域具有重要的实际意义。

该微波附件组合使用简便，可以结合平台中的信号源、频谱仪、功率计及各类模拟器等射频仪器资源来实现射频测量通道的资源扩展、大功率信号的衰减调理、微波功率合成等功能。在遇到故障时能够快速、准确的进行定位分析，节省了维护的时间，提高了工作效率。

### 参考文献：

[1] 任宇辉, 昂正全. 微波测试系统中开关网络的设计与实现 [J]. 电讯技术, 2011, 51 (3): 98-101.

[2] 吴越航. 基于 Flask 的自动化微波测试平台 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

[3] 武维婷, 赵咏梅. 自动测试系统中的射频与微波开关 [J]. 中国新通信, 2017, 19 (01): 53.

[4] 曲志明. 某微波测试仪器热设计研究 [A]. 中国电子学会. 2017 年全国微波毫米波会议论文集 (下册) [C]. 中国电子学会: 中国电子学会微波分会, 2017.

[5] 郭国君, 申建华. 便携式微波测试暗盒的设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2018 (17): 76-77.

[6] 夏新运. 微波实时频谱分析仪射频前端设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[7] 鲍连升, 赵峰. 基于 LabVIEW 的微波射频器件自动化测试系统设计 [J]. 电子测试, 2009 (5): 44-46.

[8] 王昊. 雷达中频信号开关阵列控制软件设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[9] 俞顺鑫. 微波模块综合测试系统设计与实现 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

[10] 赖雨瑞. 微波射频探针的去嵌入研究及测试应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

(上接第 159 页)

### 参考文献：

[1] 刘旭, 罗滇生, 姚建刚, 等. 基于负荷分解和实时气象因素的短期负荷预测 [J]. 电网技术, 2009, 33 (12): 94-100.

[2] 陈志业, 牛东晓, 张英怀, 等. 电网短期电力负荷预测系统的研究 [J]. 中国电机工程学报, 1995, 15 (1): 30-35.

[3] 陈衡, 王科, 陈丽华. 基于滤波算法的节假日短期负荷预测研究 [J]. 电气技术, 2014 (9): 12-15.

[4] 李明干, 孙健利, 刘沛. 基于卡尔曼滤波的电力系统短期负荷预测 [J]. 继电器, 2004 (4): 9-12.

[5] 朱大奇, 史慧. 神经网络原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[6] 董长虹. Matlab 神经网络与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[7] 魏亮亮, 毛森, 吕杭. 电力系统短期负荷预测方法研究 [J]. 科技经济导刊, 2019, 27 (8): 89.

[8] 郑春, 朱文广, 肖园, 等. 常用电力负荷预测方法的对比研究 [J]. 现代国企研究, 2019 (4): 139.

[9] 吴尚尚. 短期电力负荷预测影响因素分析与研究 [J]. 中国新技术新产品, 2019 (1): 63-64.

[10] 邱涌. 电力系统负荷预测中存在的问题及探讨 [J]. 低碳世界, 2018 (12): 74-75.

[11] 刘鑫, 滕欢, 宫毓斌, 等. 基于改进卡尔曼滤波算法的短期负荷预测 [J]. 电测与仪表, 2019, 56 (3): 42-46.

[12] 马静波, 杨洪耕. 自适应卡尔曼滤波在电力系统短期负荷预测中的应用 [J]. 电网技术, 2005 (1): 75-79.

[13] 贺觅知. 基于卡尔曼滤波的电力系统动态状态估计算法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006.