

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—202X

TCAS 测试仪校准规范

Calibration Specification for TCAS Tester

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

TCAS测试仪
校准规范

Calibration Specification for
TCAS Tester

JJF XXXX—XXXX

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国电子科技集团公司第十研究所
中国计量科学研究院

参加起草单位：北京飞机维修工程有限公司
北京国测科仪科技有限公司
西安诚全蓝创测控技术有限公司

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

XXX

XXX

XXX

参加起草人：

XXX

XXX

XXX

XXX

目 录

引 言.....	III
1 范围.....	1
2 术语和计量单位.....	1
2.1 术语.....	1
2.2 计量单位.....	1
3 概述.....	1
4 计量特性.....	2
4.1 输出频率.....	2
4.2 输出功率.....	2
4.3 相位噪声.....	2
4.4 谐波.....	2
4.5 杂波.....	2
4.6 剩余调频.....	2
4.7 脉冲调制开关比.....	2
4.8 应答信号脉冲间隔.....	2
4.9 应答信号脉冲宽度.....	2
4.10 脉冲上升/下降时间.....	2
4.11 幅度方位.....	2
4.12 相位方位.....	3
4.13 距离.....	3
4.14 驻波比.....	3
4.15 频率测量.....	3
4.16 功率测量.....	3
4.17 脉冲宽度测量.....	3
4.18 脉冲间隔测量.....	3
4.19 脉冲上升/下降时间测量.....	3
4.20 高度.....	3
4.21 垂直速度.....	3
4.22 速度.....	3
4.23 端口电阻.....	3
5 校准条件.....	4
5.1 环境条件.....	4
5.2 测量标准及其他设备.....	4
6 校准项目和校准方法.....	6

6.1 外观及工作正常性检查.....	7
6.2 输出频率.....	7
6.3 输出功率.....	8
6.4 剩余调频.....	8
6.5 相位噪声.....	8
6.6 谐波.....	9
6.7 杂波.....	9
6.8 脉冲调制开关比.....	10
6.9 应答脉冲间隔.....	10
6.10 应答脉冲宽度.....	12
6.11 脉冲上升/下降时间.....	12
6.12 幅度方位.....	12
6.13 相位方位.....	13
6.14 距离.....	14
6.15 高度.....	15
6.16 垂直速度.....	15
6.17 速度.....	16
6.18 端口电阻.....	17
6.19 驻波比.....	17
6.20 频率测量.....	17
6.21 功率测量.....	18
6.22 脉冲宽度测量.....	19
6.23 脉冲间隔测量.....	19
6.24 脉冲上升/下降时间测量.....	19
7 校准结果.....	20
8 复校时间间隔.....	20
附录 A.....	21
附录 B.....	25
附录 C.....	29
附录 D.....	40

引 言

本规范依据 JJF 1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》编写，相关术语及测量不确定度评定遵循 JJF 1001-2011 《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》编制。

本规范为首次发布。

TCAS测试仪校准规范

1 范围

本规范适用于 TCAS 测试仪和具备 TCAS 测试功能的综合测试仪的校准。

2 术语和计量单位

2.1 术语

2.1.1 TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System)

TCAS是一种机载交通预警和防撞系统,它的主要功能是通过向临近飞机发出信号,并接收这些飞机的应答机(ATC)的回应,来获取周围飞机的代码、高度、航向和其他数据,判断是否存在潜在的碰撞威胁,并在必要时提示飞行员规避风险,预防飞机相撞,保障飞行安全。

2.1.2 断续振荡信号(squitter)

断续振荡信号由飞机的应答机周期性广播产生,它包含了飞机的身份、位置、高度等相关信息。

2.1.3 幅度方位(Amplitude Comparison Direction Finding)

幅度方位是基于不同方向来的电波在空间中传播时,到达测向天线阵列各单元的相对强度差异进行方位测量的一种方法。

2.1.4 相位方位(Phase Comparison Direction Finding)

相位方位是基于不同方向来的电波在空间中传播时,到达测向天线阵列各单元的相对相位差异进行方位测量的一种方法。

2.2 计量单位

2.2.1 海里 n mile

距离单位, $1 \text{ n mile} \approx 1852\text{m}$, 仅用于航程。

2.2.2 节 kts

速度单位, 复合单位海里/小时的简称, $1 \text{ kts} = 1 \text{ n mile/h} \approx 0.514\text{m/s}$, 仅用于航行。

3 概述

TCAS 测试仪主要用于机载 TCAS 设备的测试与维护。

TCAS 测试仪通常由发射机单元、接收机单元、天线接口单元、控制及显示单元组成,是收发一体的仪器。接收机单元捕获机载设备发出的询问信号,并对信号进行测量和解析,发射机单元模拟其他飞机产生 C 模式/S 模式应答信号,应答信号中包含目标飞机的高度、距离、方位等信息,让机载 TCAS 设备接收并处理这些信号,从而检查机

载设备的交通预警与防撞功能。

TCAS 测试仪通常配备一个或八个端口，单个端口主要用于基本的信号发送和接收测试，八个端口可实现多种天线选件的方位模拟功能，具体的形式取决于测试仪的型号和设计。

4 计量特性

4.1 输出频率

范围：1087MHz~1093MHz。

最大允许误差：±10kHz。

4.2 输出功率

范围：-90dBm~+1dBm。

最大允许误差：±1dB。

4.3 相位噪声

≤-80dBc/Hz@100kHz。

4.4 谐波

≤-50 dBc。

4.5 杂波

≤-55 dBc, 350 MHz to 1800 MHz。

4.6 剩余调频

≤250Hz Peak。

4.7 脉冲调制开关比

>80dB 。

4.8 应答信号脉冲间隔

ATCRBS模式：1.45μs，最大允许误差：±10ns 。

S模式：P1: 0μs, P2: 1μs, P3: 3.5μs, P4: 4.5μs，最大允许误差：±10ns。

4.9 应答信号脉冲宽度

ATCRBS 模式：0.45μs，最大允许误差：±10ns。

S模式：0.5μs，最大允许误差：±10ns。

4.10 脉冲上升/下降时间

上升时间：50ns~100ns，最大允许误差：±25ns。

下降时间：50ns~200ns，最大允许误差：±25ns。

4.11 幅度方位

范围：-20dBm~-35dBm（发射机设置为-20dBm），最大允许误差：±0.556dB

4.12 相位方位

范围： $-180^{\circ} \sim +180^{\circ}$ ，最大允许误差： $\pm 4^{\circ}$ 。

4.13 距离

范围：S模式：0 to 160 n mile；C模式：0.082 to 160 n mile。

最大允许误差： ± 0.01 n mile (≤ 30 n mile)， ± 0.10 n mile (> 30 n mile)。

4.14 驻波比

< 1.4 。

4.15 频率测量

1030MHz 最大允许误差： ± 50 kHz。

4.16 功率测量

测量范围： $+17$ dBm $\sim +60$ dBm。

最大允许误差： ± 0.5 dB。

4.17 脉冲宽度测量

范围： $0.8 \mu\text{s} \sim 30.25 \mu\text{s}$ ，最大允许误差： ± 15 ns。

4.18 脉冲间隔测量

范围： $2.0 \mu\text{s} \sim 23 \mu\text{s}$ ，最大允许误差： ± 10 ns。

4.19 脉冲上升/下降时间测量

范围： < 200 ns，最大允许误差： ± 20 ns。

4.20 高度

范围： $-304.8\text{m} \sim 38618.2\text{m}$ ($-1000\text{ft} \sim 126700\text{ft}$)： $\pm 15.24\text{m}$ (50ft)。

4.21 垂直速度

范围： $\pm 165.65\text{m/s}$ (32608ft/min)。

最大允许误差： $\pm 0.33\text{m/s}$ (64ft/min)。

4.22 速度

范围： ± 2000 kts。

最大允许误差： ± 1 kts。

4.23 端口电阻

范围： $1 \Omega \sim 2\text{M} \Omega$ 。

最大允许误差： $\pm 10\%$ 。

注：以上所列各项校准参数包括了 TCAS 测试仪的主要可校准参数的测量范围和最大允许误差（典型值），校准时应以被校测试仪技术说明书中所列的技术参数及技术指标为准。

5 校准条件

5.1 环境条件

环境温度：(23±5)℃。

相对湿度：<80%。

电源电压及频率：(220±11)V，(50±1)Hz。

周围无影响正常校准工作的电磁干扰和机械振动。

5.2 测量标准及其他设备

5.2.1 数字万用表

阻抗测量范围：1Ω~2MΩ。

最大允许误差：≤2%。

5.2.2 测量接收机

频率范围：950 MHz~1200 MHz。

功率测量范围：-100 dBm~+10 dBm，最大允许误差：±(0.15 dB~0.65 dB)。

剩余调频：<5 Hz。

5.2.3 功率座

频率范围：950 MHz~1200 MHz。

功率测量范围：-25 dBm~+10 dBm，最大允许误差：±(0.15 dB~0.30 dB)。

5.2.4 频率计

频率范围：950 MHz~1300 MHz，最大允许误差：±1×10⁻⁷。

5.2.5 频谱分析仪

频率范围：10MHz~4GHz。

电平测量动态范围：≥90 dB，最大允许误差：±(1~2) dB。

相位噪声：<-90 dBc/Hz@100 kHz offset。

5.2.6 示波器

带宽：≥2GHz。

采样率：≥20GS/s。

幅度测量最大允许误差：±2%。

时间测量最大允许误差：±2×10⁻⁵。

具备幅度解调功能，脉冲特性自动测量功能。

5.2.7 信号发生器

频率范围：950 MHz~1300 MHz。

输出功率：-60 dBm~0 dBm，最大允许误差：±0.6dB。

具有外脉冲调制功能。

5.2.8 函数发生器 1:

具备任意波形产生功能，采样率200 MSa/s以上，存储深度：1 MSa以上。

支持外触发方式输出。

最大输出幅度（峰值）： $\geq 1.5\text{ V}$ 。

具备同步脉冲输出功能。

5.2.9 函数发生器 2

具备任意波形产生功能，存储深度：1 MSa以上。

支持外触发方式输出。

最大输出幅度（峰值）： $\geq 5\text{ V}$ 。

具备同步脉冲输出功能。

5.2.10 任意波发生器

采样率3GSa/s以上，存储深度：128MSa以上。

支持外触发方式输出。

最大输出幅度（峰值）： $\geq 1.5\text{ V}$ 。

具备同步脉冲输出功能。

5.2.11 矢量网络分析仪

频率范围：10MHz~3GHz。

电压驻波比测量范围：1~2。

电压驻波比测量不确定度 $U_{\text{rel}}(k=2)$ ：10%。

相位测量范围： $-180^\circ \sim +180^\circ$ 。

相位测量不确定度 $U(k=2)$ ： 1.2° 。

5.2.12 脉冲功率放大器

频率范围：950 MHz~1200 MHz。

最大输入功率：0dBm。

增益： $\geq 60\text{ dB}$ 。

5.2.13 衰减器

频率范围：950 MHz~1200 MHz。

衰减：30dB。

可承受平均功率： $\geq 10\text{ W}$ 。

5.2.14 定向耦合器

频率范围：950 MHz~1200 MHz。

耦合度：20dB。

隔离度：50dB。

VSWR: <1.15。

最大输入功率(峰值)： ≥ 1 kW。

5.2.15 环形器

频率范围：950 MHz~1200 MHz。

插损： ≤ 1 dB。

隔离度： ≥ 18 dB。

可承受平均功率： ≥ 10 W。

5.2.16 50 欧负载

频率范围：DC~2GHz。

可承受平均功率：0.5W。

电阻值50 Ω ，最大允许误差： $\pm 10\%$ 。

注：测量八端口仪器至少需要配备3个负载。

5.2.17 峰值功率计

载波频率：950 MHz~1200 MHz。

脉冲功率测量：-30 dBm~+20 dBm，最大允许误差： ± 0.2 dB。

视频带宽： ≥ 100 MHz。

上升时间测量： < 10 ns。

6 校准项目和校准方法

校准项目如表 1 所示。

表 11 校准项目表

序号	校准项目
1	外观及工作正常性检查
发射指标项目	
2	输出频率
3	输出功率
4	相位噪声
5	谐波
6	杂波
7	剩余调频

8	脉冲调制开关比
9	应答信号脉冲间隔
10	应答信号脉冲宽度
11	脉冲上升/下降时间
12	幅度方位
13	相位方位
14	距离
15	高度
16	垂直速度
17	速度
18	端口电阻
接收指标项目	
19	驻波比
20	频率测量
21	功率测量
22	脉冲宽度测量
23	脉冲间隔测量
24	脉冲上升/下降时间测量

6.1 外观及工作正常性检查

被校测试仪外观应完好无损，无影响正常工作的机械损伤，其开关、按键，旋钮应牢固且调节正常，显示屏能正常显示。将检查结果记录在附录A.1中。

测试仪通电后，应能正常工作，并按规定时间进行预热。

6.2 输出频率

6.2.1 如图 1 连接校准仪器。

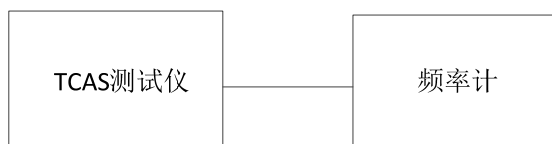


图 1 输出频率校准连接示意图

6.2.2 设置被校测试仪为连续波输出方式，按被校测试仪技术说明书要求，遵循低、中、高的原则选取输出频率。

6.2.3 使用频率计测量频率，测试结果记录于表 A.1。

注：

- 1 对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接50Ω负载。

2 若测试仪内部有多个射频源，应分别测量每个射频源输出频率。

6.3 输出功率

6.3.1 设置被校测试仪为连续波输出方式，频率 1090MHz，输出功率设置为 0dBm。

6.3.2 测量接收机设置为调谐电平测量模式，如图 2 连接校准仪器，完成绝对功率校准，记录当前功率点的调谐电平测量值到表 A. 2 中。



图 2 输出功率校准连接示意图

6.3.3 减小被测件输出功率直到最小值，重复步骤 6.3.2 测量每个功率点的调谐电平。

注：

- 1 对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接50Ω负载。
- 2 若测试仪内部有多个射频源，应分别测量每个射频源输出功率。
- 3 使用测量接收机功率测量模式时，请注意功率传感器的测量范围，若被校测试仪源输出范围不能满足该测量范围，可选其他信号源辅助完成功率测量到调谐电平测量的校准。

6.4 剩余调频

6.4.1 如图 2 右连接校准仪器。

6.4.2 被校测试仪设置为连续波输出方式，频率 1090MHz，输出功率置为-20dBm（或按仪器技术说明书要求设置）。

6.4.3 设置测量接收机为调频测量模式，设置解调滤波器为 300 Hz~3 kHz，检波方式为峰值检波（或按说明书要求的检波方式），将所测频偏值作为剩余调频测量结果并记录到表 A. 3。

注：

- 1 对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接50Ω负载。
- 2 若测试仪内部有多个射频源，应分别测量每个射频源剩余调频。

6.5 相位噪声

6.5.1 如图 3 连接校准仪器。

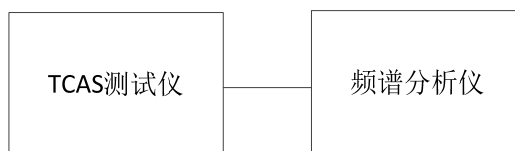


图 3 相位噪声校准连接示意图

6.5.2 被校测试仪设置为连续波输出方式，频率 1090MHz，输出功率置为-20dBm（或按仪器技术说明书要求设置）。

6.5.3 设置频谱分析仪扫频宽度为 250kHz（扫频宽度一般设置为频率偏置的 2.5 倍），使用峰值搜索功能标记载波功率，打开差值标记功能。设置频谱分析仪轨迹模式为平均，设置标记功能为噪声标记功能。

6.5.4 频谱分析仪设置标记到偏离载波 100kHz 处，此时的归一化功率差值为所测相位噪声值，将结果记录于表 A. 4。

注：

- 1 对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接50Ω负载。
- 2 若测试仪内部有多个射频源，应分别测量每个射频源相位噪声。

6.6 谐波

6.6.1 如图 3 连接校准仪器。

6.6.2 被校测试仪设置为连续波输出方式，频率 1090MHz，输出功率置为-20dBm（或按仪器技术说明书要求设置）。

6.6.3 设置频谱分析仪频率范围为 350 MHz~4000 MHz，调节频谱分析仪分辨带宽，使频谱分析仪噪声电平低于被测谐波指标要求。使用频谱分析仪标记差值功能测量输出信号的二次、三次谐波，并记录测试值于表 A. 5。

注：

- 1 对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接50Ω负载。
- 2 若测试仪内部有多个射频源，应分别测量每个射频源谐波。

6.7 杂波

6.7.1 如图 3 连接校准仪器。

6.7.2 被校测试仪设置为连续波输出方式，频率 1090MHz，输出功率置为-20dBm（或按仪器技术说明书要求设置）。

6.7.3 设置频谱分析仪频率范围为规定值（按说明书要求给定测量范围，如 350 MHz~1800 MHz，如未给定则为三次谐波以内），调节频谱分析仪分辨带宽，使频谱分析仪噪声电平低于被测杂散指标要求。使用频谱分析仪标记差值功能测量带内杂散信号电平偏离载波频率信号电平的电平差，并记录测试值于表 A. 6。

注：

- 1 对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接50Ω负载。
- 2 若测试仪内部有多个射频源，应分别测量每个射频源杂波。

6.8 脉冲调制开关比

6.8.1 如图 3 连接校准仪器。

6.8.2 被校测试仪设置为连续波输出方式，频率 1090MHz，输出功率置为-20dBm（或按仪器技术说明书要求设置）。

6.8.3 频谱分析仪中心频率设置 1090MHz，扫频宽度为 100 kHz，参考电平适当，分辨带宽自动。使用频谱分析仪峰值搜索功能标记功率最大点，打开差值标记功能。

6.8.4 打开测试仪的脉冲调制开关，设置频谱仪分辨带宽 RBW 为 10Hz，读取频谱仪差值光标，记录此时功率差值于表 A. 7。

注：

- 1 对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接50Ω负载。
- 2 若测试仪内部有多个射频源，应分别测量每个射频源脉冲开关比。

6.9 应答脉冲间隔

6.9.1 C 模式应答脉冲间隔

6.9.1.1 如图 4 连接校准仪器。

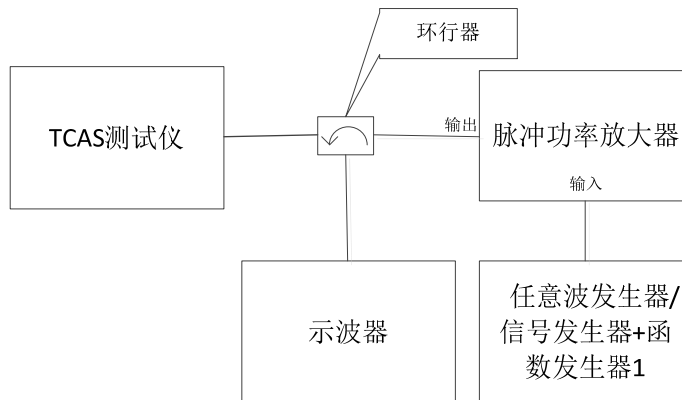


图 4 C 模式应答脉冲间隔校准连接示意图

6.9.1.2 被校测试仪设静态目标 1 个，C 模式，海拔 30300ft，应答功率设置为 0dBm（或技术说明书要求）。

6.9.1.3 任意波发生器（或信号发生器+函数发生器）设置载波频率 1030MHz，调制脉冲按图 5 生成 C 模式询问脉冲。

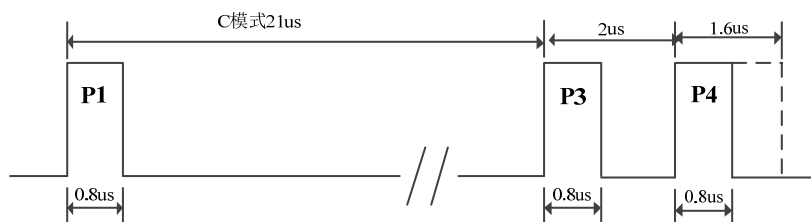


图 5 C 模式询问脉冲信号格式图

6.9.1.4 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益，使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

6.9.1.5 打开示波器幅度解调功能，应答信号格式见图 6，测量 F1-C1、C1-A1、F1-F2 的脉冲间隔，测试结果记录于表 A. 8。

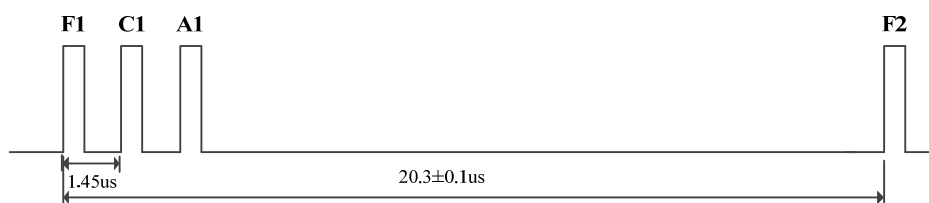


图 6 C 模式应答脉冲信号格式图

6.9.2 S 模式应答脉冲间隔

6.9.2.1 如图 7 连接校准仪器。

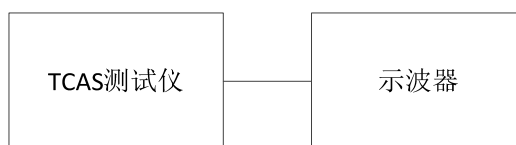


图 7 S 模式应答脉冲间隔校准连接示意图

6.9.3 被校测试仪设静态目标 1 个，S 模式，应答功率设置为 0dBm（或按技术说明书要求），开启断续振荡应答信号。

6.9.4 打开示波器幅度解调功能，应答信号格式见图 8，测量测量 P1-P2、P1-P3、P1-P4 的相对脉冲位置，测试结果记录于表 A. 8。

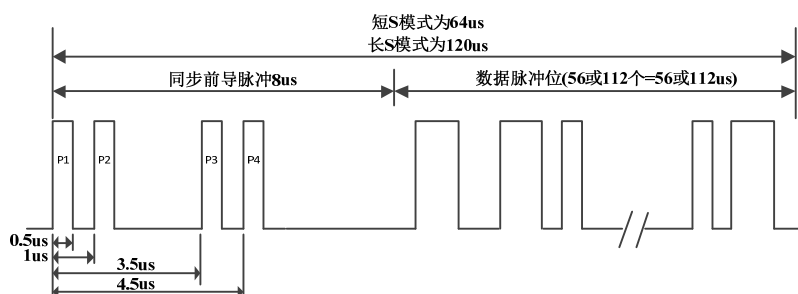


图 8 S 模式应答脉冲信号格式图

注：

- 1 对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接 50Ω 负载。
- 2 若被校测试仪具备脉冲间隔变化功能，应分别测量相应变化的脉冲间隔。

6.10 应答脉冲宽度

6.10.1 C 模式应答脉冲宽度

6.10.1.1 如图 4 连接校准仪器。

6.10.1.2 被校测试仪设静态目标 1 个, C 模式, 海拔 30300ft, 应答功率设置为 0dBm (或技术说明书要求)。

6.10.1.3 任意波发生器 (或信号发生器+函数发生器) 设置载波频率 1030MHz, 调制脉冲按图 5 生成 C 模式询问脉冲。

6.10.1.4 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益, 使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

6.10.1.5 打开示波器幅度解调功能, 应答信号格式见图 6, 测量 F1、C1、F2 的脉冲宽度, 测试结果记录于表 A. 9。

6.10.2 S 模式应答脉冲宽度

6.10.2.1 如图 7 连接校准仪器。

6.10.3 被校测试仪设静态目标 1 个, S 模式, 应答功率设置为 0dBm (或按技术说明书要求), 开启断续振荡应答信号。

6.10.4 打开示波器幅度解调功能, 应答信号格式见图 8, 测量 P1、P2、P3、P4 的脉冲宽度, 测试结果记录于表 A. 9。

注:

- 1 对于配备八个端口的测试仪, 校准时未使用的端口应连接50Ω负载。
- 2 若被校测试仪具备脉冲宽度变化功能, 应分别测量相应变化的脉冲宽度。

6.11 脉冲上升/下降时间

6.11.1 按图 7 连接校准仪器。

6.11.2 被校测试仪设静态目标 1 个, S 模式, 输出功率 0dBm (或按技术说明书要求), 开启断续振荡应答信号。

6.11.3 使用示波器幅度解调功能测量脉冲上升/下降时间, 测试结果记录于表 A. 10。

6.11.4 若被校测试仪具备多种脉冲上升/下降时间功能, 则依次设置被校测试仪其他脉冲上升/下降时间, 参照上述步骤, 完成脉冲相应脉冲上升/下降时间的测量。

注:

- 1 对于配备八个端口的测试仪, 校准时未使用的端口应连接50Ω负载。
- 2 若被校测试仪具备多种脉冲上升/下降时间选择功能, 应分别测量每种脉冲上升/下降时间。

6.12 幅度方位

6.12.1 设置被校测试仪为连续波输出方式, 频率 1090MHz, 输出功率设置为 0dBm。

6.12.2 测量接收机设置为调谐电平测量模式, 如图 2 连接被校测试仪上天线端口 1 至测量接收机, 完成绝对功率校准。

6.12.3 设置被校测试仪输出功率为-20dBm,方位从 0° 开始,按 30° 步进增加至 330° ,将每个方位设置值对应的调谐电平测量值记录到表 A. 11 中。

6.12.4 将被校测试仪上天线端口 2~端口 4、下天线端口 1~端口 4 分别连至测量接收机,按步骤 6.12.3 测量每个端口的调谐电平值。

注:

- 1 该项目仅针对配备八个端口的测试仪,校准时未使用的端口应连接50Ω负载。
- 2 若测试仪内部有多个天线选件,多个射频源,应分别测量每个天线选件在各射频源的幅度方位。

6.13 相位方位

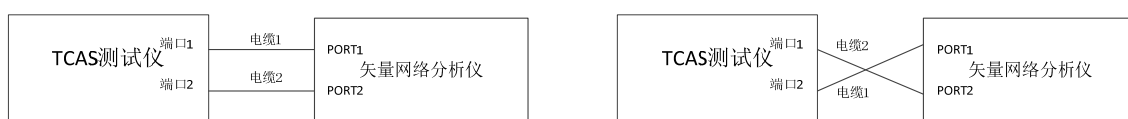


图 9 相位方位校准连接示意图

6.13.1 如图 9 左连接校准仪器。

6.13.2 设置被校测试仪为连续波输出方式,频率 1090MHz,输出功率-20dBm (或按技术说明书要求),方位 0° 。

6.13.3 矢量网络分析仪设置为 A/B 测量,外源模式,中心频率 1090MHz,扫宽 0Hz,显示相位格式,中频带宽适当(通常 100Hz),测量该连接方式下的相位偏移值,记为 P1。

6.13.4 如图 9 右交换被校测试仪端的连接电缆,测量该连接方式下的相位偏移值,记为 P2。

6.13.5 通过下式计算得到测量系统的电缆相位偏移值,将电缆相位偏移值输入矢量网络分析仪,消除电缆相位偏移。

$$\text{电缆相位偏移值} = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (1)$$

6.13.6 设置被校测试仪方位从 0° 开始,按 30° 步进增加至 330° ,测量端口 2-端口 1 的相位差,记录到表 A. 12。

6.13.7 将电缆 1 分别连至被校测试仪上天线端口 3、端口 4,按步骤 6.13.6 测量上天线每个端口相对于端口 1 的相位差。

6.13.8 将电缆 2 接被校测试仪下天线端口 1,电缆 1 分别连至被校测试仪下天线端口 2~端口 4,按步骤 6.13.6 测量下天线每个端口相对于端口 1 的相位差。

注:

- 1 该项目仅针对配备八个端口的测试仪,校准时未使用的端口应连接50Ω负载。
- 2 若测试仪内部有多个天线选件,多个射频源,应分别测量每个天线选件在各射频源的相位方位。

位。

6.14 距离

6.14.1 C 模式距离

6.14.1.1 如图 4 连接校准仪器。

6.14.1.2 被校测试仪设静态目标 1 个，C 模式，按技术说明书要求设置最小距离，应答功率设置为 0dBm（或技术说明书要求）。

6.14.1.3 任意波发生器（或信号发生器+函数发生器）设置载波频率 1030MHz，调制脉冲按图 5 生成 C 模式询问脉冲。

6.14.1.4 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益，使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

6.14.1.5 打开示波器幅度解调功能，用示波器测量询问脉冲 P3-应答脉冲 F1 之间的时间间隔，测试结果记录于表 A. 13。

6.14.1.6 按被校测试仪技术说明书要求，遵循低、中、高的原则，设置被校测试仪距离，重复步骤 6.14.1.5，完成 C 模式距离的测量。

6.14.2 S 模式距离

6.14.2.1 如图 4 连接校准仪器。

6.14.2.2 被校测试仪设静态目标 1 个，S 模式，按技术说明书要求设置最小距离，应答功率设置为 0dBm（或技术说明书要求）。

6.14.2.3 任意波发生器设置载波频率 1030MHz，调制脉冲按图 10 生成 S 模式询问脉冲。

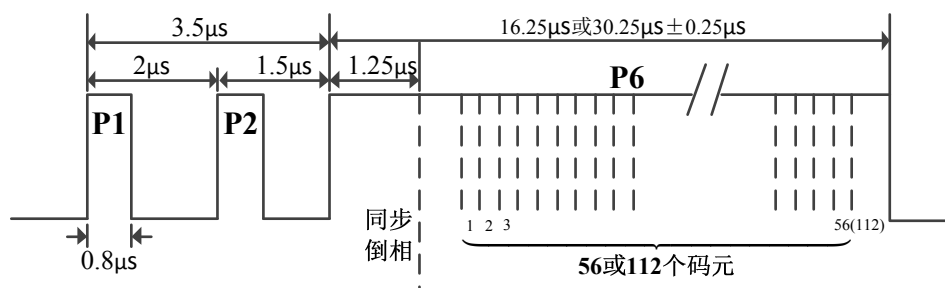


图 10 S 模式询问脉冲信号格式图

6.14.2.4 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益，使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

6.14.2.5 打开示波器幅度解调功能，用示波器测量询问脉冲 P6 的同步倒相点至应答信号第一个脉冲上升沿之间的时间间隔，测量结果记录到表 A. 13 中。

6.14.2.6 按被校测试仪技术说明书要求，遵循低、中、高的原则，设置被校测试仪距离，重复步骤 6.14.2.5，完成 S 模式距离的测量。

注：

- 1 对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接 50Ω 负载。
- 2 距离模拟与时间间隔的换算公式： $t=2 \times L/c+t_0$ （其中，C 模式： $t_0=3\mu\text{s}$ ，S 模式： $t_0=128\mu\text{s}$ ）

c ——光速常数, $c \approx 2.998 \times 10^8$ m/s

L ——距离模拟, 单位为米。(1nmi=1852m)

6.15 高度

6.15.1 如图 4 连接校准仪器。

6.15.2 被校测试仪设静态目标 1 个, C 模式, 按技术说明书要求设置最小高度, 应答功率设置为 0dBm (或技术说明书要求)。

6.15.3 任意波发生器 (或信号发生器+函数发生器) 设置载波频率 1030MHz, 调制脉冲按图 5 生成 C 模式询问脉冲。

6.15.4 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益, 使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

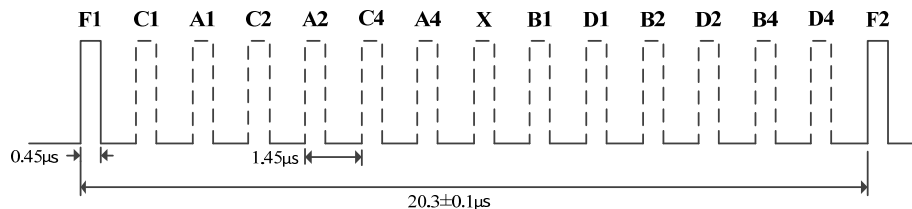
6.15.5 打开示波器幅度解调功能, 显示完整应答信号波形, 判断海拔高度编码是否与设置一致, 测量结果记录于表 A. 14。

6.15.6 按被校测试仪技术说明书要求, 遵循低、中、高的原则, 设置被校测试仪高度, 重复步骤 6.15.5, 完成 C 模式高度的测量。

注:

1 对于配备八个端口的测试仪, 校准时未使用的端口应连接 50 Ω 负载。

2 C 模式应答信号格式及高度编码。



高度	D2	D4	A1	A2	A4	B1	B2	B4	C1	C2	C4
-1000ft	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
-900ft	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
10000ft	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
12000ft	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0
30300ft	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
126700ft	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

更多高度传输编码见《ICAO 国际民用航空公约附件 10-航空电信 第四卷 监视和防撞系统》

6.16 垂直速度

6.16.1 信号格式比对法

6.16.1.1 如图 11 连接校准仪器。

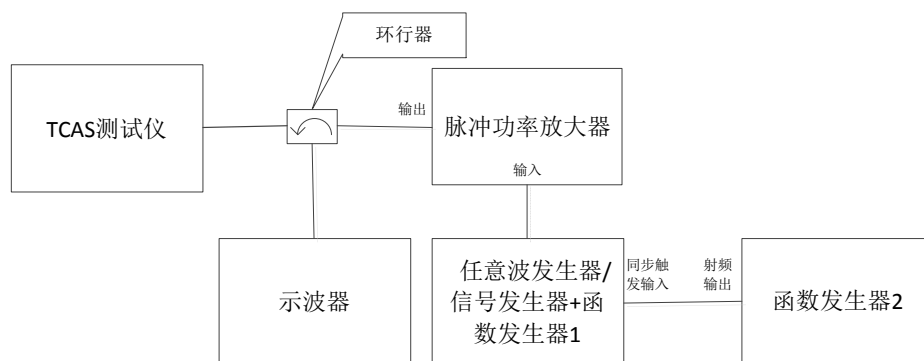


图 11 垂直速度（信号格式比对法）校准连接示意图

6.16.1.2 被校测试仪设置动态目标 1 个，C 模式，设置初始高度 3048m（10000ft），设置垂直速度 609.6m/min（2000ft/min），应答功率设置为 0dBm（或技术说明书要求）。

6.16.1.3 任意波发生器（或信号发生器+函数发生器）设置载波频率 1030MHz，调制脉冲按图 5 生成 C 模式询问脉冲。

6.16.1.4 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益，使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

6.16.1.5 函数发生器 2 设置脉冲信号幅度为 5V，脉宽 1μs，周期 60s。

6.16.1.6 打开示波器幅度解调功能，显示完整应答信号波形，观察高度编码变化是否由 3048m（10000ft）变化为 3657.6m（12000ft），测量结果记录于表 A. 15。

6.16.2 闭环测试法

6.16.2.1 被校测试仪设置动态目标 1 个，S 模式扩展，初始高度 3048m（10000ft），垂直速度 609.6m/min（2000ft/min）。

6.16.2.2 1 分钟后，被校测试仪通过捕获断续振动信号和数据记录显示目标的高度是否为 3657.6m（12000ft），测量结果记录于表 A. 15。

6.17 速度

6.17.1 被校测试仪设置本机经度为 0.000000，纬度为 0.000000，航向角度为 0°，高度为 3657.6m（12000ft）。

6.17.2 被校测试仪设置动态目标 1 个，S 模式扩展，高度 3657.6m（12000ft），速度 360kts，距离 5 n mile，航迹 180°（目标相对于本机相向运动）。

6.17.3 50s 后，被校测试仪通过捕获断续振动信号和数据记录显示目标的经度和纬度值，依据经纬度计算距离公式换算成距离，观察距离误差是否小于技术说明书要求，测量结果记录于表 A. 16。

$$d = 2r * \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos \varphi_1 * \cos \varphi_2 * \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

d —— 两点间距离，km；

r —— 地球半径，km；

φ_1 和 λ_1 —— 第一个点的纬度和经度，°；

φ_2 和 λ_2 ——第二个点的纬度和经度，°。

$$\Delta d = d - (v \times \Delta t - d_0)$$

Δd ——两点间距离误差，km；

v ——速度，km/h；

Δt ——运行时间，s；

d_0 ——两点间初始距离，km。

注：该方法适用于具备断续振荡信号和数据记录闭环测量功能的测试仪。

6.18 端口电阻

6.18.1 如图 12 连接校准仪器。

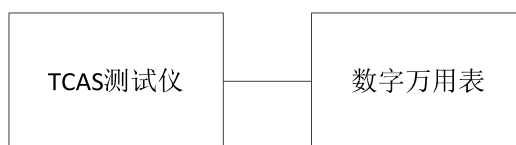


图 12 端口电阻校准连接示意图

6.18.2 选择被校测试仪天线选件。

6.18.3 用数字万用表测量电阻值，将测试结果记录于附录表 A. 17 中。

6.18.4 依次测量每个端口的电阻。

6.18.5 如有其他天线选件，重复步骤 6.2.2~6.2.4，完成其他天线选件下电阻的测量。

注：该项目针对八个端口的被校测试仪。

6.19 驻波比

6.19.1 如图 13 连接校准仪器。

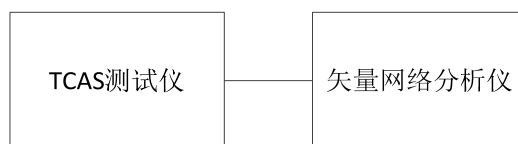


图 13 驻波比校准连接示意图

6.19.2 设置矢量网络分析仪中心频率为 1060MHz，扫宽 100MHz，中频带宽 100Hz，完成矢量网络分析仪自校准。

6.19.3 使用矢量网络分析仪测量驻波比，测量结果记录到表 A. 18。

注：对于配备八个端口的测试仪，应分别测量每个端口的驻波比，校准时未使用的端口应连接 50Ω 负载。

6.20 频率测量

6.20.1 如图 14 连接校准仪器。

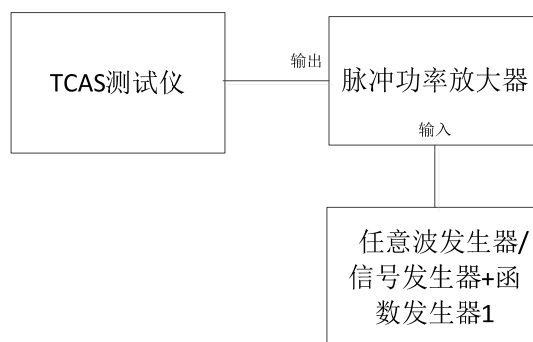


图 14 测量频率校准连接示意图

6.20.2 被校测试仪设置为测量模式。

6.20.3 任意波发生器设置载波频率 1030MHz, 调制脉冲按图 10 生成 S 模式询问脉冲。

6.20.4 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益, 使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

6.20.5 在被校测试仪测量界面读取信号频率, 测量结果记录到表 A. 19。

6.20.6 按被校测试仪技术说明书要求, 遵循低、中、高的原则, 设置任意波发生器载波频率, 完成频率测量功能校准。

注: 对于配备八个端口的测试仪, 校准时未使用的端口应连接 50Ω 负载。

6.21 功率测量

6.21.1 如图 15 连接校准仪器。

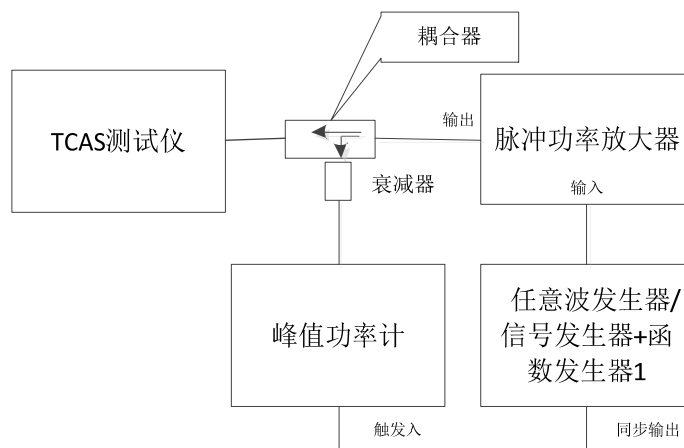


图 15 功率测量校准连接示意图

6.21.2 峰值功率计自校准。

6.21.3 任意波发生器设置载波频率 1030MHz, 调制脉冲按图 10 生成 S 模式询问脉冲。

6.21.4 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益, 使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

6.21.5 被校测试仪设置为测量模式, 分别记录被校测试仪显示的信号功率和峰值功率计测量结果 (补偿耦合器衰减器的耦合路损耗) 到表 A. 20。

6.21.6 按被校测试仪技术说明书要求, 遵循低、中、高的原则, 完成功率测量功能校准。

注：对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接50Ω负载。

6.22 脉冲宽度测量

6.22.1 如图 16 连接被校仪器。

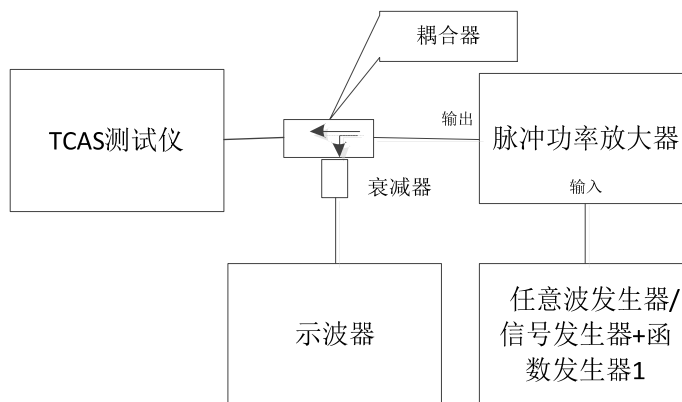


图 16 脉冲宽度校准连接示意图

6.22.2 任意波发生器设置载波频率 1030MHz，调制脉冲按图 10 生成 S 模式询问脉冲。

6.22.3 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益，使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

6.22.4 打开示波器幅度解调功能，用示波器测量脉冲宽度；被校测试仪设置为测量模式，分别记录被校测试仪显示的脉冲宽度和示波器测量结果到表 A. 21。

注：对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接 50Ω 负载。

6.23 脉冲间隔测量

6.23.1 如图 16 连接被校仪器。

6.23.2 任意波发生器设置载波频率 1030MHz，调制脉冲按图 10 生成 S 模式询问脉冲。

6.23.3 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益，使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

6.23.4 打开示波器幅度解调功能，用示波器测量脉冲间隔；被校测试仪设置为测量模式，分别记录被校测试仪显示的脉冲间隔和示波器测量结果到表 A. 22。

注：对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接 50Ω 负载。

6.24 脉冲上升/下降时间测量

6.24.1 如图 16 连接被校仪器。

6.24.2 任意波发生器设置载波频率 1030MHz，调制脉冲按图 10 生成 S 模式询问脉冲。

6.24.3 调节任意波发生器输出电平和功率放大器增益，使功率放大器输出功率在被校测试仪接收功率范围内。

6.24.4 打开示波器幅度解调功能，用示波器测量脉冲上升/下降时间；被校测试仪设置为测量模式，分别记录被校测试仪显示的脉冲上升/下降时间和示波器测量结果到表 A. 23。

注：对于配备八个端口的测试仪，校准时未使用的端口应连接 50Ω 负载。

7 校准结果

校准后，出具校准证书。校准证书至少应包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点(如果与实验室的地址不同)；
- d) 证书的唯一性标识(如编号)，每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

8 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的。因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔，推荐复校时间间隔为1年。

附录 A

原始记录格式

被校测试仪外观及工作正常性检查：正常 不正常

表 A.1 输出频率

标称频率	实测值

表 A.2 输出功率

端口	标称功率	实测值

表 A.3 剩余调频

频率	实测值

表 A.4 相位噪声

频率	偏移频率	实测值

表 A.5 谐波

频率	谐波次数	实测值
	二次	
	三次	

表 A.6 杂波

频率	测量频率范围	实测值

表 A. 7 脉冲开关比

频率	实测值

表 A. 8 应答信号脉冲间隔

工作模式	测试项目	标称值	实测值

表 A. 9 应答信号脉冲宽度

工作模式	测试项目	标称值	实测值

表 A. 10 脉冲上升/下降时间

测试项目	实测值

表 A. 11 幅度方位

方位	端口 1		端口 2		端口 3		端口 4	
	标称值	测量值	标称值	测量值	标称值	测量值	标称值	测量值
0°								
30°								
...								
330°								

表 A. 12 相位方位

方位	端口 2-端口 1		端口 3-端口 1		端口 4-端口 1	
	标称值	测量值	标称值	测量值	标称值	测量值
0°						
30°						
...						

330°					
------	--	--	--	--	--

表 A. 13 距离

工作模式	距离设置	理论延时	实测值

表 A. 14 高度

海拔	描述	结果
	实测值与高度设置一致	<input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败
	实测值与高度设置一致	<input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败
	实测值与高度设置一致	<input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败

表 A. 15 垂直速度

垂直速度	描述	结果
	实测高度编码变化与垂直速度设置一致	<input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败

表 A. 16 速度

速度	描述	结果
	距离误差小于技术说明书要求	<input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败

表 A. 17 端口电阻

标称值	端口	实测值

表 A. 18 驻波比

频率	端口	实测值

表 A. 19 频率测量

接收频率	实测值

--	--

表 A. 20 功率测量

接收功率设置	峰值功率计实测值	TCAS 测试仪实测值

表 A. 21 脉冲宽度测量

测试项目	示波器实测值	TCAS 测试仪实测值

表 A. 22 脉冲间隔测量

测试项目	示波器实测值	TCAS 测试仪实测值

表 A. 23 脉冲上升/下降时间测量

测试项目	示波器实测值	TCAS 测试仪实测值
脉冲上升时间		
脉冲下降时间		

附录 B

校准证书内页格式

表 B.1 输出频率

标称频率	实测值	$U(k=2)$

表 B.2 输出功率

端口	标称功率	实测值	$U(k=2)$

表 B.3 剩余调频

频率	实测值	$U(k=2)$

表 B.4 相位噪声

频率	偏移频率	实测值	$U(k=2)$

表 B.5 谐波

频率	谐波次数	实测值	$U(k=2)$
	二次		
	三次		

表 B.6 杂波

频率	测量频率范围	实测值	$U(k=2)$

表 B.7 脉冲开关比

频率	实测值	$U(k=2)$

表 B.8 应答信号脉冲间隔

工作模式	测试项目	标称值	实测值	$U(k=2)$

表 B.9 应答信号脉冲宽度

工作模式	测试项目	标称值	实测值	$U(k=2)$

表 B.10 脉冲上升/下降时间

测试项目	实测值	$U(k=2)$

表 B.11 幅度方位

方位	端口 1			端口 2			端口 3			端口 4		
	标称值	测量值	$U(k=2)$	标称值	测量值	$U(k=2)$	标称值	测量值	$U(k=2)$	标称值	测量值	$U(k=2)$
0°												
30°												
...												
330°												

表 B.12 相位方位

方位	端口 2-端口 1			端口 3-端口 1			端口 4-端口 1		
	标称值	测量值	$U(k=2)$	标称值	测量值	$U(k=2)$	标称值	测量值	$U(k=2)$
0°									
30°									
...									

330°									
------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

表 B.13 距离

工作模式	距离设置	理论延时	实测值	$U(k=2)$

表 B.14 高度

海拔	描述	结果
	实测值与高度设置一致	<input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败
	实测值与高度设置一致	<input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败
	实测值与高度设置一致	<input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败

表 B.15 垂直速度

垂直速度	描述	结果
	实测高度编码变化与垂直速度设置一致	<input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败

表 B.16 速度

速度	描述	结果
	距离小于技术说明书要求	<input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败

表 B.17 天线阻抗

标称值	端口	实测值	$U(k=2)$

表 B.18 驻波比

频率	端口	实测值	$U(k=2)$

表 B.19 频率测量

接收频率	实测值	$U(k=2)$

--	--	--

表 B.20 功率测量

接收功率设置	峰值功率计实测值	TCAS 测试仪实测值	$U(k=2)$

表 B.21 脉冲宽度测量

测试项目	示波器实测值	TCAS 测试仪实测值	$U(k=2)$

表 B.22 脉冲间隔测量

测试项目	示波器实测值	TCAS 测试仪实测值	$U(k=2)$

表 B.23 脉冲上升/下降时间测量

测试项目	示波器实测值	TCAS 测试仪实测值	$U(k=2)$
脉冲上升时间			
脉冲下降时间			

附录 C

主要项目校准不确定度评定示例

C.1 输出频率测量不确定度评定

C.1.1 被测量描述

输出频率采用直接测量法，以频率计（R5373P）测量被校 TCAS 测试仪（RGS-2000NG）输出频率 1090MHz 为例进行测量不确定度分析。

C.1.2 不确定的来源及测量模型

经分析，不确定度来源有以下 3 项：

- (1) 频率计测频不准引入的不确定度分量 u_1 ；
- (2) 频率计分辨力引入的不确定度分量 u_2 ；
- (3) 重复性引入的不确定度分量 u_3 。

建立如下不确定度评定数学模型：

$$f = f_0 + \Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3$$

f —— 被测频率

f_0 —— 频率计示值

Δf_1 —— 频率计测频误差

Δf_2 —— 频率计分辨力误差

Δf_3 —— 重复性引入的误差

C.1.3 标准不确定度评定

C.1.3.1 频率计测频不准引入的不确定度分量

频率计测频准确度为 2×10^{-8} ，按均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，可得引入的相对不确定度分量为 $u_{1r} = 1.16 \times 10^{-8}$ 。

C.1.3.2 频率计分辨力引入的不确定度分量

频率计分辨力为 0.01Hz，按均匀分布，包含因子为 $k = \sqrt{3}$ ，则引入的不确定度分量为 $u_2 = 0.00289$ Hz，转换为相对不确定分量为 $u_{2r} = 3 \times 10^{-12}$ 。

C.1.3.3 重复性引入的不确定度分量

重复性测量结果见表 C. 1

表 C. 1 输出频率重复性测量结果

次数	1	2	3	4	5
测量结果/MHz	1089.999717	1089.999715	1089.999717	1089.999715	1089.999718

次数	6	7	8	9	10
测量结果/MHz	1089.999716	1089.999718	1089.999717	1089.999719	1089.999718

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为： $s(x)=1.34\text{Hz}$ ，取单次测量结果，则相对标准不确定度为：

$$u_{3r}=1.23 \times 10^{-9}$$

C.1.4 合成标准不确定度

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_{cr}=\sqrt{u_{1r}^2+u_{2r}^2+u_{3r}^2}=1.2 \times 10^{-8}$$

C.1.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则 $U_{rel}=3 \times 10^{-8}$

C.2 输出功率测量不确定度评定

C.2.1 被测量描述

输出功率采用直接测量法，以测量接收机（FSMR）+功率传感器（NRP-Z37）测量 TCAS 测试仪（RGS-2000NG）输出功率（0dBm、-50dBm、-90 dBm）为例进行测量不确定度分析。

C.2.2 不确定的来源及测量模型

经过分析，不确定度来源有以下 8 项：

- (1) 功率传感器校准因子不确定度引入的不确定度分量 u_1 ；
- (2) 功率传感器噪声引入的不确定分量 u_2 ；
- (3) 功率传感器零点偏离引入的不确定度分量 u_3 ；
- (4) 接收机线性度引入的不确定度分量 u_4 ；
- (5) 接收机调谐电平量程切换引入的不确定度分量 u_5 ；
- (6) 接收机分辨力引入的不确定度分量 u_6 ；
- (7) 失配引入的不确定度分量 u_7 ；
- (8) 重复性引入的不确定度分量 u_8 。

建立如下不确定度评定数学模型：

$$P=P_0+\Delta P_1+\Delta P_2+\Delta P_3+\Delta P_4+\Delta P_5+\Delta P_6+\Delta P_7+\Delta P_8$$

P ——被测功率

P_0 ——测量接收机示值

ΔP_1 ——功率传感器校准因子不确定度引入的误差

ΔP_2 ——功率传感器噪声引入的误差

- ΔP_3 ——功率传感器零点偏离引入的误差
- ΔP_4 ——接收机线性度引入的误差
- ΔP_5 ——接收机调谐电平量程切换引入的误差
- ΔP_6 ——接收机分辨力引入的误差
- ΔP_7 ——失配引入的误差
- ΔP_8 ——重复性引入的误差

C.2.3 标准不确定度评定

C.2.3.1 功率传感器校准因子不确定度引入的不确定度分量 u_1

根据功率传感器的校准证书，校准因子引入的不确定度为 2.0% ($k=2$)，则不确定度分量为 $u_1=1.0\%$ ，换算成对数则为： $u_1=0.044\text{dB}$ 。

C.2.3.2 功率传感器校零后的不准引入的不确定度分量 u_2

根据功率传感器的技术指标，功率传感器校零后引入的不确定度为 $400\text{nW}(k=2)$ ，校零电平为 1mW ，则转化为相对形式为 $u_2=200\text{nW}/1\text{mW}=2\times 10^{-4}$ ，对数形式表示为 $u_2=10\times \lg(1+2\times 10^{-4})=0.0008\text{dB}$ 。

C.2.3.3 功率传感器噪声引入的不确定分量 u_3

根据功率传感器的技术指标，噪声电平为 $240\text{nW}(k=2)$ ，当测量功率为 1mW 时，则转化为相对形式为 $u_3=120\text{nW}/1\text{mW}=1.2\times 10^{-4}$ ，对数形式表示为 $u_3=10\times \lg(1+1.2\times 10^{-4})=0.0005\text{dB}$ 。

C.2.3.4 接收机线性度引入的不确定度分量 u_4

根据技术资料，接收机线性度误差为 $\pm 0.01\text{dB}\pm 0.005\text{dB}/10\text{dB}$ ，则 0dBm 、 -50dBm 、 -90dBm 线性度引入的误差分别为 0.01dB 、 0.035dB 、 0.065dB 。按均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，可得引入的相对不确定度分量分别为 0.006dB 、 0.020dB 、 0.038dB 。

C.2.3.5 接收机调谐电平量程切换引入的不确定度分量 u_5

根据技术资料，测量 0dBm 不会发生量程切换，测量 -50dBm 、 -90dBm 电平值时会发生两次电平切换，每次切换引入的误差为 0.005dB ，切换两次，则为 0.01dB 。按均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则测量 0dBm 、 -50dBm 、 -90dBm 的不确定度分量分别为 0dB 、 0.006dB 、 0.006dB 。

C.2.3.6 接收机分辨力引入的不确定度分量 u_6

测量电平值的分辨力为 0.001dB ，按均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则其引入的不确定度分量为 $u_6=0.0003\text{dB}$ 。

C.2.3.7 失配引入的不确定度分量 u_7

RGS-2000NG RF 输出端口的驻波比为 1.4, 转换为反射系数 $\Gamma_g=0.167$, 功率传感器端口驻波比为 1.15, 转换为反射系数 $\Gamma_1=0.070$, 则失配引入的误差为: $8.686 \times \max(|\Gamma_g||\Gamma_1|) = 0.102\text{dB}$ 。失配引入的误差服从反正弦分布, 包含因子 $k=\sqrt{2}$, 因此 $u_7=0.072\text{dB}$ 。

C.2.3.8 重复性引入的不确定度分量 u_8

RGS-2000NG 输出 1090MHz 连续波信号, 功率 0dBm、-50dBm、-90dBm 重复性测量结果, 见表 C.2。

表 C.2 输出功率重复性测量结果

测量 0dBm										
次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果/dBm	-0.25	-0.24	-0.26	-0.23	-0.18	-0.24	-0.23	-0.23	-0.25	-0.26
测量 -50dBm										
次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果/dBm	-50.39	-50.45	-50.42	-50.45	-50.46	-50.41	-50.47	-50.42	-50.48	-50.38
测量 -90dBm										
次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果/dBm	-90.37	-90.26	-90.28	-90.31	-90.4	-90.3	-90.35	-90.33	-90.25	-90.22

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差分别为 0.023dB、0.034dB、0.057dB, 取单次测量结果, 则重复性引入的不确定度分量为: 0.025dB、0.044dB、0.057dB。

C.2.4 合成标准不确定度

以上各不确定度分量互不相关, 则

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2} = (0.085 \sim 0.093) \text{ dB}$$

C.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则 $U=ku_c=0.20\text{dB}$ 。

C.3 应答信号脉冲间隔测量不确定度评定

C.3.1 被测量描述

应答信号脉冲间隔采用直接测量法。利用数字示波器对输入信号脉冲上升沿之间、上升-下降沿之间的时间间隔 (如脉冲间隔、脉冲宽度、距离模拟等参数) 进行测量。下面以数字示波器 DSO91304A 测量 RGS-2000NG C 模式应答脉冲 F1-F2 的脉冲位置为例, 分析测量不确定度。

C.3.2 不确定的来源及测量模型

脉冲间隔测量 C 模式应答脉冲 F1 上升沿上幅度为 50% 脉冲幅度点到 F2 上升沿幅度 50% 幅度点之间的时间间隔测量，经过分析，不确定度来源主要有以下 3 方面：

- (1) 示波器时基不准引入的不确定度 u_1 ；
- (2) 示波器噪声基底抖动引入不确定度 u_2 ；
- (3) 重复测量引入的不确定度 u_3 。

建立如下不确定度评定数学模型：

$$T = T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3$$

T —— 被测脉冲间隔

T_0 —— 示波器示值

ΔT_1 —— 示波器时基不准引入的误差

ΔT_2 —— 示波器噪声基底抖动引入的误差

ΔT_3 —— 重复度引入的误差

C.3.3 标准不确定度评定

C.3.3.1 示波器时基不准引入的不确定度 u_1

示波器时基不准引入的误差为：

$$E_{T_{\text{base}}} = E_{BA} \times \Delta T$$

示波器时基准确度为 1×10^{-6} ，所测时间间隔为 $21 \mu\text{s}$ ，因此：

$$E_{T_{\text{base}}} = 2.1 \times 10^{-11} \text{ s}$$

则取区间半宽度为 $a = 1.1 \times 10^{-11} \text{ a} = 0.008 \text{ ns}$ ，服从均匀分布，包含因子为 $k = \sqrt{3}$ ，则其引入的不确定度分量为 $u_1 = 0.007 \text{ ns}$ 。

C.3.3.2 示波器噪声基底抖动引入的不确定度 u_2

查示波器仪器资料可知：

$$JMF = \pm \frac{5}{16} \times \sqrt{JMF_{\text{edge1}}^2 + JMF_{\text{edge2}}^2}$$

$$JMF_{\text{edgeN}} = \pm \sqrt{\left(\frac{NF}{A} \times T_r\right)^2 + SJ^2}$$

其中： JMF (*Jitter Measurement Floor*) 由于抖动造成时间间隔测量上的误差， JMF 为时钟抖动以及噪声抖动两部分的均方根和， NF 表示噪底， A 表示信号幅度， T_r 表示信号上升时间， SJ (*Sample Jitter*) 表示采样时钟抖动。测量结果 JMF 为参与运算的两次边沿 JMF 的合成。

RGS-2000NG 输出功率为 0dBm，经环行器后，脉冲幅度 A 约为 200mV，因此使用 50mV/div 刻度，此时示波器标称噪底约为 $NF=2mV$ 。RGS-2000NG 发出的脉冲信号上升时间实测值为 $T_r=70ns$ ，此时采样时钟抖动有效值为 $SJ=0.5ps$ 。

带入计算可得：

$$JMF=\pm 0.22ns$$

则取区间半宽度为 $a=0.22ns$ ，服从均匀分布，包含因子为 $k=\sqrt{3}\sqrt{3}$ ，则其引入的不确定度分量为 $u_2=0.13ns$ 。

C.3.3.3 重复测量引入的不确定度 u_3

C 模式应答信号脉冲 F1-F2 时间间隔重复性测量结果，见表 C.3。

表 C.3 应答信号脉冲间隔重复性测量结果

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果/ μs	20.995	20.996	20.995	20.995	20.996	20.995	20.995	20.996	20.995	20.995

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为： $s(x)=0.48ns$ ，取单次测量结果，则由重复性引入的标准不确定度为： $u_3=0.48ns$

C.3.4 合成标准不确定度

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^3 u_i^2} = 0.49ns$$

C.3.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则 $U=ku_c=1ns$ 。

C.4 相位方位测量不确定度评定

C.4.1 被测量描述

相位方位采用直接测量法。下面以矢量网络分析仪 N5244A 直接测量 TCAS 测试仪 RGS-2000NG 端口 2-端口 1 间（方位设置为 90° ）的相位差。

C.4.2 不确定度来源及数学模型

通过分析，不确定度来源主要分为以下方面：

- (1) 矢量网络分析仪测量相位不准引入的不确定度 u_1
- (2) 重复测量引入的不确定度 u_2

建立如下不确定度评定数学模型：

$$P=P_0+ \Delta P_1+ \Delta P_2$$

P ——被测相位

P_0 ——矢量网络分析仪示值

ΔP_1 ——矢量网络分析仪测量相位不准引入的误差

ΔP_2 ——重复度引入的误差

C.4.3 标准不确定度评定

C.4.3.1 矢量网络分析仪测量相位不准引入的不确定度 u_1

根据矢量网络分析仪校准证书，频率 1090MHz，矢量网络分析仪测量相位扩展不确定度 $U=0.7^\circ$ ， $k=2$ ，则 $u_1=0.35^\circ$ 。

C.4.3.2 重复测量引入的不确定度 u_2

RGS-2000NG 输出信号上天线端口 1-端口 2 的相位差重复性测量结果，见表 C. 4。

表 C. 4 相位差重复性测量结果

次数	1	2	3	4	5
测量结果/ $^\circ$	71.31	71.18	71.52	71.44	71.69
次数	6	7	8	9	10
测量结果/ $^\circ$	71.58	71.43	71.35	71.46	71.53

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为： $u_2=0.15^\circ$

C.4.4 合成标准不确定度

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.4^\circ$$

C.4.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则 $U=ku_c=0.8^\circ$ 。

C.5 驻波比测量不确定度评定

C.5.1 被测量描述

采用直接测量法，以矢量网络分析仪 N5244A 直接测量 TCAS 测试仪 RGS-2000NG 端口 1 驻波比为例，进行测量不确定度分析。

C.5.2 不确定度来源及数学模型

通过分析，不确定度来源主要分为以下方面：

(1) 矢量网络分析仪测量驻波比不准引入的不确定度 u_1

(2) 重复测量引入的不确定度 u_2

建立如下不确定度评定数学模型：

$$S = S_0 + \Delta S_1 + \Delta S_2$$

S ——被测反射系数

S_0 ——矢量网络分析仪示值

ΔS_1 ——矢量网络分析仪测量反射系数不准引入的误差

ΔS_2 ——重复度引入的误差

C.5.3 标准不确定度评定

C.5.3.1 矢量网络分析仪测量驻波比不准引入的不确定度 u_1

根据矢量网络分析仪校准证书，频率 1090MHz，矢量网络分析仪测量反射模值不确定度 $U=0.020$ ， $k=2$ 服从均匀分布，则 $u_1=0.010$ 。

C.5.3.2 重复测量引入的不确定度 u_2

RGS-2000NG 上天线端口 1 反射系数重复性测量结果，见表 C. 5。

表 C. 5 反射系数重复性测量结果

次数	1	2	3	4	5
测量结果	0.119	0.115	0.119	0.119	0.115
次数	6	7	8	9	10
测量结果	0.111	0.115	0.115	0.115	0.119

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为： $u_2=0.003$

C.5.4 合成标准不确定度

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.011$$

C.5.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则反射系数 $U=ku_c=0.022$

即驻波比 1.27： $U=0.06$ ($k=2$)

C.6 频率测量结果的测量不确定度评定

C.6.1 被测量描述

用任意波发射器（8191A）输出脉冲调制信号，TCAS 测试仪（RGS-2000NG）直接读取频率，。

C.6.2 不确定度来源及数学模型

通过分析，不确定度来源主要分为以下方面：

- (1) 任意波发生器频率不准引入的不确定度 u_1
- (2) 重复测量引入的不确定度 u_2

以任意波发射器输出信号为标准源，直接校准 TCAS 测试仪，建立如下不确定度评定数学模型：

$$f = f_0 + \Delta f_1 + \Delta f_2$$

f ——被测频率

f_0 ——任意波发生器频率值

Δf_1 ——任意波发生器频率不准引入的误差

Δf_2 ——重复度引入的误差

C.6.3 标准不确定度评定

C.6.3.1 任意波发生器频率不准引入的不确定度 u_1

根据任意波发生器 8191A 的技术说明书，频率准确度为 1×10^{-6} ，服从均匀分布，包含因子为 $k=\sqrt{3}$ ，则其引入的不确定度分量 $u_1=0.58 \times 10^{-6}$ 。

C.6.3.2 重复测量引入的不确定度 u_2

RGS-2000NG 频率测量重复性测量结果，见表 C. 6。

表 C. 6 频率测量重复性测量结果

次数	1	2	3	4	5
测量结果/MHz	1029.997	1029.992	1029.998	1029.999	1029.995
次数	6	7	8	9	10
测量结果/MHz	1029.997	1029.993	1029.998	1029.996	1030.000

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为： $u_2=0.0026\text{MHz}$ ，则相对标准不确定度为： 2.5×10^{-6}

C.6.4 合成标准不确定度

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_{\text{crel}} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 2.6 \times 10^{-6}$$

C.6.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则 $U=ku_{\text{crel}}=6 \times 10^{-6}$

C.7 功率测量结果的测量不确定度评定

C.7.1 被测量描述

以 TCAS 测试仪 RGS-2000NG 为例，任意波发生器和信号发生器发出的询问脉冲信号，通过功率放大器后，一方面通过耦合器直通路进入 RGS-2000NG，在 RGS-2000NG 测量界面可直接读取前导脉冲 P_1 的峰值功率，另一方面，通过定向耦合器的耦合端以及衰减器，进入脉冲功率计对 P_1 的峰值功率进行测量。

C.7.2 不确定度来源

通过分析，不确定度来源主要分为以下 5 个方面：

- (1) 脉冲功率计测量峰值功率不准引入的不确定度 u_1 ；
- (2) 衰减器不准引入的不确定度 u_2 ；
- (3) 耦合器耦合度不准引入的不确定度 u_3 ；

(4) 失配引入的不确定度 u_4 ;

(5) 重复测量引入的不确定度 u_5 ;

以脉冲功率计测量结果为标准值，直接校准 TCAS 测试仪的测量误差，建立如下不确定度评定数学模型：

$$P = P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5$$

P —— 被测功率

P_0 —— 峰值功率计示值

ΔP_1 —— 脉冲功率计测量峰值功率不准引入的误差

ΔP_2 —— 衰减器不准引入的误差

ΔP_3 —— 耦合器耦合度不准引入的误差

ΔP_4 —— 失配引入的误差

ΔP_5 —— 重复性引入的误差

C.7.3 标准不确定度评定

C.7.3.1 脉冲功率计测量峰值功率不准引入的不确定度 u_1

查脉冲功率计功率座校准证书，校准因子引入的不确定度为 1.4% ($k=2$)，因此引入的不确定度分量为 0.7%，转化为对数形式， $u_1=0.03\text{dB}$ 。

C.7.3.2 衰减器不准引入的不确定度 u_2

查衰减器校准证书，1GHz 时 30dB 衰减不确定度为 0.04dB ($k=2$)，则引入的不确定度分量为 $u_2=0.02\text{dB}$ 。

C.7.3.3 耦合器耦合度不准引入的不确定度 u_3

查耦合器校准证书，1GHz 时 20dB 耦合度的不确定度为 0.20dB ($k=2$)，则引入的不确定度分量为 $u_3=0.10\text{dB}$ 。

C.7.3.4 失配引入的不确定度 u_4

根据测量方法，主要考虑从放大器输出通过耦合器后到被测件端口驻波影响，查资料可得，功率放大器输出端驻波比为 1.5，耦合器输入、输出端口驻波比实测值 1.04、1.04，RGS-2000NG 输入端驻波比 1.4，因此可得失配影响为：

$$\delta(\text{dB}) = 8.686 \times \sqrt{|\Gamma_G|^2 |\Gamma_{DG}|^2 + |\Gamma_L|^2 |\Gamma_{DL}|^2}$$

其中 Γ_G 、 Γ_L 分别为源端和功率测量端的反射系数， Γ_{DG} 、 Γ_{DL} 分别为耦合器输入输出端口的反射系数，经计算可得： $|\Gamma_G|=0.2$ ， $|\Gamma_L|=0.17$ ， $|\Gamma_{DG}|=|\Gamma_{DL}|=0.02|\Gamma_{DL}|=0.02$ ， $|\Gamma_{DG}|=0.05$ ，带入计算可得： $\delta=0.06\text{dB}=0.05\text{dB}$ ，失配引入的误差服从反正弦分布，因此 $u_4=0.04\text{dB}$ 。

C.7.3.5 重复测量引入的不确定度 u_5

RGS-2000NG 测量 S 模式询问信号 P₁ 脉冲功率重复性测量结果，见表 C.7。

表 C.7 脉冲功率重复性测量结果

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果/dBm	53.37	53.21	53.26	53.31	53.40	53.29	53.35	53.18	53.24	53.17

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为： $u_5=0.08\text{dB}$ 。

C.7.4 合成标准不确定度

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u_i^2} = 0.14\text{dB}$$

C.7.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则 $U=ku_c=0.28\text{dB}$ 。

附录 D

典型型号测试仪器指标对比表

在此列举了典型型号的应答机/测距机测试仪（包括美国 VIAVI 公司的 RGS-2000NG、IFR6000、广州航新公司的 TTS-1000）的技术指标作为对比参考。

指标项		型号		
		RGS-2000NG	IFR6000	TTS-1000
1.	输出频率	TCAS: 1087MHz~1093MHz, ± 10 kHz	1090MHz, ± 10 kHz	TCAS: 1085MHz~1095MHz, ± 5 kHz
2.	输出功率	TCAS: -90dBm~+1dBm, ± 1 dB(1090MHz)	天线端口: (-67~-2) dBm, ± 2 dB; I/O 端: (-95~-47) dBm, ± 1 dB; (-115~-95) dBm, ± 2 dB	-90dBm~+1dBm, ± 1 dB(1090MHz)
3.	相位噪声	<-80dBc/Hz@100kHz	/	<-80dBc/Hz@100kHz
4.	谐波	<-50dBc	/	<-50dBc
5.	杂波	<-55dBc,350MHz~1800MHz	/	<-55dBc,350MHz~1800MHz
6.	剩余调频	250Hz Peak	/	250Hz Peak
7.	脉冲调制开关比	>80dB	/	>80dB
8.	应答信号脉冲间隔	C 模式: 距离前导: 1.45 μ s, ± 10 ns 脉冲位置可调 S 模式: P1: 0 μ s, P2: 1 μ s, P3: 3.5 μ s, P4: 4.5 μ s, ± 10 ns 脉冲位置可调	C 模式: F1-F2: 20.30 μ s ± 25 ns F1-C1: 1.45 μ s ± 25 ns C1-A1: 1.45 μ s ± 25 ns S 模式: P1-P2: 1 μ s ± 25 ns P1-P3: 3.50 μ s ± 25 ns P1-P4: 4.50 μ s ± 25 ns	C 模式: 距离前导: 1.45 μ s, ± 10 ns 脉冲位置可调 S 模式: P1: 0 μ s, P2: 1 μ s, P3: 3.5 μ s, P4: 4.5 μ s, ± 10 ns 脉冲位置可调

指标项		型号		
		RGS-2000NG	IFR6000	TTS-1000
9.	应答信号脉冲宽度	C 模式: 0.45 μ s \pm 10ns S 模式: 0.5 μ s \pm 10ns	C 模式: 0.45 μ s \pm 50ns S 模式: 0.50 μ s \pm 50ns	C 模式: 0.45 μ s \pm 10ns S 模式: 0.5 μ s \pm 10ns
10.	脉冲上升/下降时间	<600 ns \pm 20ns, 上升/下降时间可选	上升时间: 50ns~100ns 下降时间: 50ns~200ns	上升时间: 50ns~100ns 下降时间: 50ns~200ns
11.	幅度方位	\pm 0.556dB	/	\pm 0.556dB
12.	相位方位	-180° ~ + 180° : \pm 4°	/	/
13.	距离	S 模式: 0n mile ~160n mile C 模式: 0.5n mile ~160n mile \pm 0.01n mile (\leq 30n mile), \pm 0.10n mile ($>$ 30n mile)	0n mile ~260n mile \pm 0.02n mile	S 模式: 0n mile ~160n mile C 模式: 0.5n mile ~160n mile \pm 0.1n mile
14.	高度	-304.8m~38618.2m (-1000ft~126700ft): \pm 15.24m (50ft)	-304.8m~38618.2m (-1000ft~126700ft): \pm 15.24m (50ft)	-304.8m~38618.2m (-1000ft~126700ft): \pm 15.24m (50ft)
15.	驻波比	<1.4	/	<1.4
16.	频率测量	1030MHz \pm 3MHz: \pm 50kHz	1029.9MHz~1030.1MHz: \pm 10kHz	1030MHz \pm 5MHz: \pm 50kHz
17.	功率测量	+17~+60dBm: \pm 0.5dB	ERP (@1030MHz) +43dBm~+58dBm: \pm 2dB Direct Connection Peak Pulse Power (@1030MHz): +43dBm~+58dBm: \pm 1dB	+17~+60dBm: \pm 1dB
18.	脉冲宽度测量	0.8 μ s~30.25 μ s: \pm 15ns	/	0.8 μ s~30.25 μ s: \pm 15ns
19.	脉冲间隔测量	2.0 μ s~23 μ s: \pm 10ns	/	2.0 μ s~23 μ s: \pm 10ns
20.	脉冲上升/下降时间测量	<200 ns: \pm 20ns	/	<200 ns: \pm 20ns
21.	速度	\pm 2000kts: \pm 1kts		/
22.	垂直速度	\pm 165.65m/s (32608ft/min): \pm 0.33m/s (64ft/min)	\pm 50.8 m/s (10000ft/min): 10%	\pm 165.65m/s (32608ft/min): \pm 0.33m/s (64ft/min)

指标项		型号		
		RGS-2000NG	IFR6000	TTS-1000
23.	天线阻抗	天线阻抗与选件相关: Honeywell Directional: E1:1.8kΩ(±10% Ω) E2:3.9kΩ(±10% Ω) E3:6.8kΩ(±10% Ω) E4:10kΩ(±10% Ω) Honeywell Omni(Bottom): 10Ω maximum Collins Phase Directional: E1:5.6kΩ(±10% Ω) E2:15kΩ(±10% Ω) E3:33.2kΩ(±10% Ω) E4:86.6kΩ(±10% Ω) Collins Phase Omni(Bottom): 10Ω maximum Collins Magnitude Directional(Top/Bottom): E1:1.2MΩ(±10% Ω) E2:686kΩ(±10% Ω) E3:390kΩ(±10% Ω) E4:220kΩ(±10% Ω) Collins Magnitude Omni(Bottom): 10 Ω maximum ACSS(Top/Bottom): E1:1kΩ(±10% Ω) E2:8kΩ(±10% Ω) E3:4kΩ(±10% Ω) E4:2kΩ(±10% Ω) ACSS Omni(Bottom): E1:10 Ω maximum	/	Top/Bottom: E1:1kΩ(±10% Ω) E2:8kΩ(±10% Ω) E3:4kΩ(±10% Ω) E4:2kΩ(±10% Ω)