中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—202X

微波着陆模拟器校准规范

Calibration Specification for Microwave Landing System Simulator

（征求意见稿）

202X-XX-XX 发布　　202X-XX-XX 实施

国 家 市 场 监 督 管 理 总 局 发 布

微波着陆模拟器
校准规范

Calibration Specification for Microwave Landing System Simulator

JJF XXXX—202X

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： 中国电子科技集团公司第二十研究所

航空工业（集团）成飞公司

北京国测科仪科技有限公司

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：

参加起草人：

目　　录

引　言 I
1 范围 2
2 引用文件 2
3 术语和计量单位 2
3.1 术语 2
4 概述 3
5 计量特性 3
5.1 输出频率 4
5.2 输出电平 4
5.3 频谱纯度 4
5.4 输出角度 4
5.5 波束脉冲特性 4
5.6 OCI 脉冲特性 5
5.7 余隙脉冲特性 5
5.8 DPSK 调制 5
5.9 衰落频率 5
5.10 螺旋桨调制 5
5.11 6.75Hz 调制 6
5.12 发播率 6
6 校准条件 6
6.1 环境条件 6
6.2 校准用设备 6
7 校准项目和校准方法 7
7.1 外观及工作正常性检查 8
7.2 输出频率 8
7.3 输出电平 9
7.4 频谱纯度 9
7.5 输出角度 10
7.6 波束脉冲特性 12
7.7 OCI 脉冲特性 13
7.8 余隙脉冲特性 14
7.9 DPSK 调制 15
7.10 衰落频率 17
7.11 螺旋桨调制 18
7.12 6.75Hz 调制 19
7.13 发播率 19
8 校准结果 20
9 复校时间间隔 20
附录 A 原始记录参考格式 21
附录 B 校准证书内页格式 26

附录 C 校准不确定度评定示例 31

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》两个文件。

本规范为首次发布。

微波着陆模拟器校准规范

1 范围

本规范适用于微波着陆模拟器的校准。其他具有相同功能的测试仪可参照执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

ICAO国际民用航空公约附件10-航空电信 第一卷 无线电导航设备

JJF（军工）166-2017 微波着陆系统地面站模拟器校准规范

GB/T 9390-2017 导航术语

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1 波束宽度 beam width

微波着陆系统中，在-3dB点上测得的扫描波束主瓣宽度。

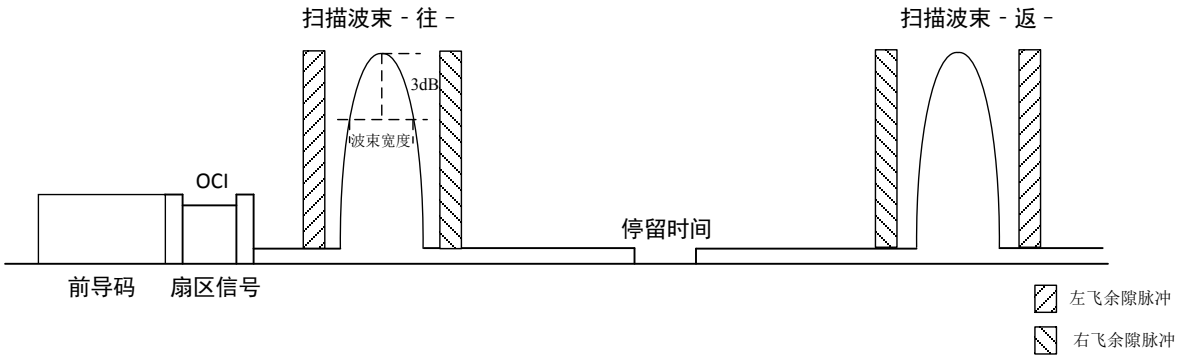

图 1 微波着陆模拟器信号格式示意图（以方位功能为例）

3.1.2 覆盖区外指示信号 out of courage indication signal (OCI)

为了防止飞机得到错误引导信息，地面天线向覆盖区外发播的一种信号，由后OCI、左OCI、右OCI三个信号组成。

3.1.3 余隙脉冲 clearance pulses

当扫描波束覆盖范围小于规定的最小覆盖范围时，用于增补覆盖扇区而发送的引导脉冲，分为左飞余隙和右飞余隙两个脉冲对。

3.1.4 衰落频率 fade rate

模拟因地面反射而影响模拟器信号电平的调制信号频率，通常又称为扇摆频率。

3.1.5 螺旋桨调制 Propeller Modulation

模拟因飞机螺旋桨遮挡而对接收信号产生的幅度调制。

4 概述

微波着陆系统，是一种工作在C频段（5031MHz ~5091MHz）的着陆系统，由地面设备和机载设备组成。其中，地面设备通过辐射方位、仰角等角度波束信号，引导飞机着陆。

微波着陆模拟器不仅模拟地面台产生的角度引导信号，还能模拟在传输过程中产生的多路径信号，螺旋桨调制信号等。模拟器发射的测试信号为时分多路复用格式，不同角度功能的信号都占有自己的发射时隙，因此在校准不同功能波束脉冲特性时时，需要模拟器提供波束的同步脉冲作为辅助。

通常由波束产生单元、显示控制单元、射频发射单元、处理器以及其他存储部件组成。

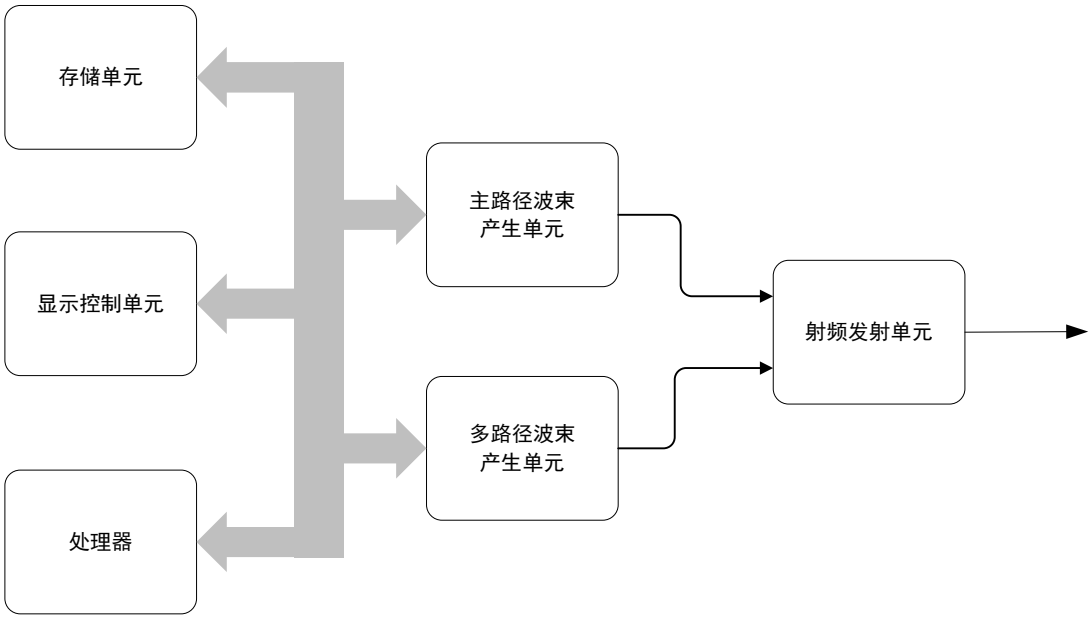

图 2 微波着陆模拟组成框图

微波着陆模拟器主要用于微波着陆机载设备的测试与维护。

5 计量特性

5.1 输出频率

5031.0 MHz~5090.7 MHz，最大允许误差：±1kHz。

5.2 输出电平

-120 dBm~-17 dBm，最大允许误差：±(1~2)dB；

5.3 频谱纯度

5.3.1 剩余调频

<1kHz（解调带宽：50Hz~15kHz，峰值检波）；

5.3.2 剩余调相

<0.5rad（解调带宽：300Hz~15kHz，峰值检波）；

5.3.3 杂散

带内杂散抑制：中心频率±(0.3MHz～1.2MHz)：＜-45dBc；

中心频率±(1.2MHz～30MHz)：＜-65dBc；

带外杂散抑制：5120MHz～5250MHz：＜-50dBm；

50kHz～12.4GHz：＜-35dBm。

5.4 输出角度

5.4.1 主路径模式

方位角范围：-62°～+62°；

仰角范围：-1.5°～29.5°；

高速方位角范围：-42°～+42°；

拉平仰角范围：-2°~10°；

反方位角：-42°~+42°；

最大允许误差：±0.005°；

5.4.2 多路径模式

方位角：-60°~60°；

高速方位角范围：-40°~+40°；

仰角范围：-1°～20°

最大允许误差：±0.05°。

5.5 波束脉冲特性

5.5.1 波束宽度

范围：0.5°，1°，2°，3°，4°，5°；

最大允许误差：±10％。

5.5.2 波束电平

主路径波束电平范围（相对于前导码电平）：-3dB～+13dB；

最大允许误差：±1dB；

旁瓣电平：-20dB;

最大允许误差：±1dB；

多路径波束电平范围（相对于前导码电平）：-14dB～+13dB；

最大允许误差：±1dB（-3～+13）dB；

±2dB（-14～-4）dB。

5.6 OCI脉冲特性

5.6.1 脉冲宽度：

100μs，最大允许误差：±10μs。

5.6.2 脉冲电平（相对于前导码电平）

范围：-4dB～+7dB，最大允许误差：±1dB。

5.7 余隙脉冲特性

5.7.1 脉冲宽度：

50μs，最大允许误差：±5μs。

5.7.2 脉冲电平（相对于前导码电平）

范围：-3dB～+13dB，最大允许误差：±1dB。

5.8 DPSK调制

5.8.1 幅度平衡

±0.4dB。

5.8.2 相位转换时间

<10μs（10%~90%幅度）。

5.8.3 180°相移

最大允许误差：±10°。

5.9 衰落频率

范围：0.5Hz，1Hz，1000Hz，最大允许误差：±1％。

5.10 螺旋桨调制

5.10.1 调制频率

1~199Hz, 最大允许误差：±1%。

5.10.2 高低电平差：

12dB，最大允许误差：±2dB。

5.10.3 占空比

15%，最大允许误差：±1%。

5.11 6.75Hz调制

5.11.1 调制频率：

6.75Hz，最大允许误差：±1%。

5.11.2 高低电平差：

12dB，最大允许误差：±1dB。

5.12 发播率

方位：13Hz，最大允许误差：±0.5Hz；

高速方位：39Hz，最大允许误差：±1.5Hz；

仰角：39Hz，最大允许误差：±1.5Hz；

反方位：6.5Hz，最大允许误差：±0.25Hz；

拉平仰角；39Hz，最大允许误差：±1.5Hz。

注：以上列举了微波着陆模拟器主要校准参数的测量范围和最大允许误差，校准时应以被校仪器技术说明书中所列的技术指标为准。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：(23±5) ℃。

相对湿度：≤80%。

电源要求：(220±11) V、(50±1) Hz。

周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 校准用设备

6.2.1 频率计

频率范围：1Hz~6GHz，准确度优于：1×10^{-8}。

6.2.2 频谱分析仪

频率范围：20Hz~13GHz；

时基准确度：优于1×10^{-6}；

显示平均噪声电平：＜-140dBm

显示非线性：±0.1dB

频率响应：±0.3dB

6.2.3 示波器

频带宽度：DC～6GHz；

采样速率：25GSa/s

时基准确度：$\pm2.5\times10^{-6}$；

直流增益精度：±2%。

具有自定义函数编辑功能，可进行包络检波。

6.2.4 测量接收机

频率范围：20Hz~6GHz；

功率测量范围：-120 dBm~0 dBm，最大允许误差：±(0.15 dB~0.65 dB)；

7 校准项目和校准方法

校准项目表见表 1

表 1 校准项目表

序号	项目名称
1	输出频率
2	输出电平
3	频谱纯度
3.1	剩余调频
3.2	剩余调相
3.3	杂散
4	输出角度
5	波束脉冲特性
5.1	波束宽度
5.2	波束电平和旁瓣电平
6	OCI脉冲特性
6.1	OCI脉冲宽度
6.2	OCI脉冲电平

7	余隙脉冲特性
7.1	余隙脉冲宽度
7.2	余隙脉冲电平
8	DPSK调制
8.1	幅度平衡
8.2	相位转换时间
8.3	180°相移
9	衰落频率
10	螺旋桨调制
10.1	调制频率
10.2	占空比
10.3	高低电平差
11	6.75Hz调制
11.1	调制频率
11.2	高低电平差
12	发播率

7.1 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。

测试仪通电后，应能正常工作，并按规定时间进行预热。

7.2 输出频率

a) 仪器连接如图 3所示，连接模拟器射频输出至频率计射频输入。

图 3 输出频率校准框图

b) 设置模拟器设置为连续波输出，设置输出电平为-17 dBm，设置波道号N为500，波道号与频率之间的转换关系可用下式换算：

$$f = 5031 + (N - 500) \times 0.3 \quad (1)$$

式中：

f ——射频频率，MHz

N——波道号，从500到699。

c) 用频率计测量频率值，记录于附录A表A. 1中。

d) 按照低、中、高的原则选取输出频率 *f*，重复步骤 c) 进行测量。

7.3 输出电平

a) 仪器连接如图 4所示，连接测量接收机的功率传感器至模拟器射频输出。

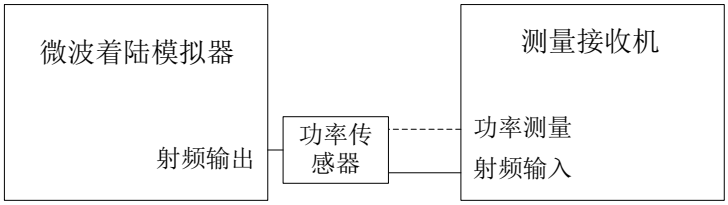

图 4 输出电平校准框图

b) 设置测量接收机为功率测量模式。

c) 设置模拟器为连续波输出方式，设置载波频率为5031MHz（波道号为500），设置输出电平为最大值（通常为-17dBm），记录当前输出电平值于附录A表A.2中。

d) 将测量接收机设置为调谐电平测量模式，与模拟器的连接方式切换为射频电缆连接，将功率测量值校准到调谐电平测量值。

e) 按照10 dB步进减小模拟器输出电平直到最小值，将每个功率点的调谐电平测量值记录到附录A表A. 2中，测量过程中注意接收机量程切换并及时校准。

f) 按低、中、高原则改变模拟器输出频率，重复b)~e)步骤测试。

7.4 频谱纯度

7.4.1 剩余调频和剩余调相

a) 仪器连接如图 5所示。

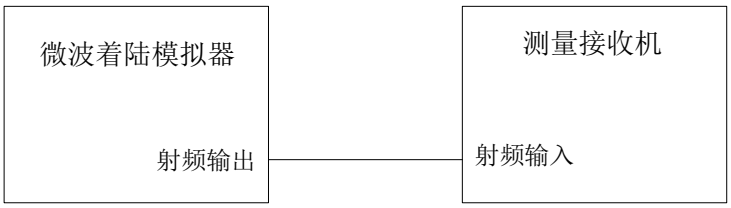

图 5 剩余调频校准框图

b) 设置模拟器为连续波输出方式，设置载波频率为5031MHz（波道号为500），输出电平设置为最大。

c) 设置测量接收机为调频测量模式，解调滤波器设置为50Hz~15kHz，正峰值检波。

d) 读取测量接收机调频频偏值，记录于附录A表A. 3中。

e) 设置接收机为调相测量模式，解调滤波器设置为300Hz~15kHz，正峰值检波。

f) 读取测量接收机调相相偏值，记录于附录A表A. 3中。

g) 按低、中、高原则改变输出频率，重复步骤c)~f)进行测量。

7.4.2 杂散

a) 仪器连接如图 6所示，连接测试仪射频输出至频谱分析仪射频输入端。

图 6 谐波校准框图

b) 设置模拟器为连续波输出方式，设置模拟器输出电平为-17dBm，载波频率为5061MHz（波道号为600）。

c) 设置频谱分析仪中心频率为5061MHz，参考电平为-10dBm，SPAN为10MHz，RBW自动。

d) 频谱分析仪测量偏离载波±（0.3～1.2）MHz范围内的最大杂散电平相对于载波电平的差值，将结果记录于附录A表A.4中。

e) 设置频谱分析仪SPAN为80MHz，使用频谱分析仪测量偏离载波±（1.2～30）MHz范围内的最大杂散电平相对于载波电平的差值,并将结果记录于附录A表A.4中。

f) 设置频谱分析仪测量范围为：5120MHz～5250MHz，搜索范围内杂散的最大电平值，记录测量结果至附录A表A.4中。

g) 设置频谱分析仪测量范围为：50kHz～12.4GHz，搜索范围内除载波信号外的最大电平值，记录测量结果至附录A表A.4中。

7.5 输出角度

a) 仪器连接如图 7所示，将模拟器射频输出端口连接到示波器输入通道。模拟器脉冲同步输出连接至示波器触发输入。

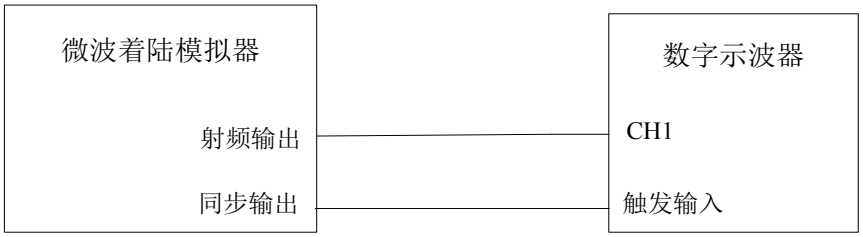

图 7 角度校准框图

b) 设置模拟器为普通进场模式，打开方位角功能，关闭其他角度功能。设置载波频率为5061MHz（波道号为600），输出电平为-17dBm，方位角电平为6dB，方位角波束

宽度为0.5°，同步脉冲设置为与方位角同步，角度设置为最小值（不同功能输出角度最大/最小值不同）。

c) 使用同步脉冲作为触发，调节触发电平，使数字示波器显示稳定的方位角信号，信号通过示波器数字检波后得到信号包络，测量“往、返”扫描波束上升沿的-3dB点（即峰值电压的70.8％电压处）之间的时间间隔t，如图 8所示

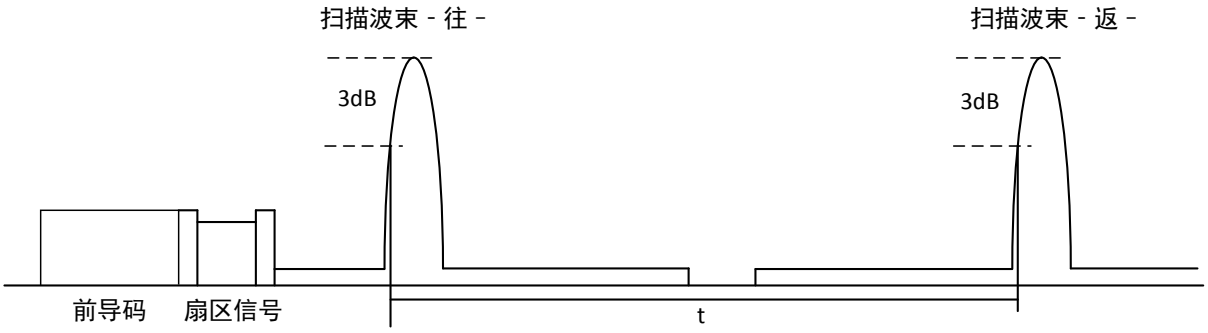

图 8 角度测量示意图

d) 利用公式（2）和往返扫描波束之间的脉冲间隔计算角度：

$$\theta = \frac{(T-t)}{2} \times V \qquad (2)$$

式中：

θ ——角度计算值，（°）；

T ——相对零度时往返扫描波束之间的时间间隔，计算方位角时为6800μs，计算仰角时为3350μs，计算高速方位角时为4800μs，计算反方位角时为4800μs，计算拉平仰角时为2800μs；

t ——往返扫描波束之间的时间间隔，μs；

V ——扫描速度比例常数。计算方位角、高速方位角、仰角时为0.02(°)/μs；计算反方位角时为-0.02(°)/μs；计算拉平仰角时为0.01(°)/μs。

e) 按公式（3）计算方位角的误差，记录计算结果至附录A表A.4中；

$$\delta_\theta = \theta - \theta_0 \qquad (3)$$

式中：

δ_θ ——角度误差，（°）；

θ ——微波着陆模拟器输出角度值，（°）；

θ_0 ——角度计算值，（°）；

f) 按照低、中、高原则改变角度，重复c)~e)步骤进行测量。

g) 设置模拟器为高速进场模式，重复c)~f)步骤测量高速方位角。

h) 设置模拟器为普通进场模式，根据附录A表A.4设置为其他角度功能，并设置相应模式的同步脉冲输出，重复c)~f)步骤测量角度。

i) 模拟器设置方位角功能开，打开多路径功能，设置主路径方位角波束电平为最小，多路径波束电平为+6dB，多路径波束宽度为0.5°，同步脉冲设置为与方位角同步，按照高、中、低原则设置多路径方位角大小，并且设置主路径方位角与多路径方位角为不同，使二者波束在时域上能完全区分开。

j) 重复c)~f)步骤，测量多路径方位角角度。

7.6 波束脉冲特性

7.6.1 波束宽度

a) 仪器按照如图 7所示连接。

b) 设置模拟器为普通进场模式，打开方位角功能，关闭其他角度功能，关闭多路径功能。设置载波频率为5061MHz(波道号为600)，射频电平为-17dBm，波束宽度为0.5°，方位角为0°，方位角电平设置为+6dB，同步脉冲设置为与方位角同步。

c) 以同步脉冲作为触发，利用数字示波器对信号进行数字检波后得到信号包络，并测量波束脉冲宽度。

d) 根据附录A附表A.5中给出的波束宽度对应的脉冲宽度，记录计算结果于附录A附表A.5中。

e) 根据附录A表A.5改变信号波束宽度值，重复c)~d)步骤测量；

f) 打开多路径功能，设置主路径方位角波束电平为最小，多路径波束电平为+6dB，多路径波束宽度为0.5°，角度与主路径方位角不同，重复c)~e)步骤测量。

7.6.2 波束电平和旁瓣电平

a) 仪器按照如图 9所示连接。

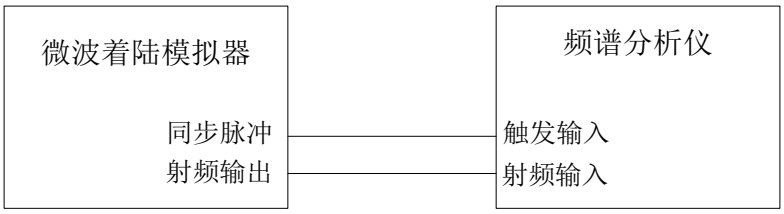

图 9 波束电平校准框图

b) 设置模拟器为普通进场模式，打开方位角功能，关闭其他角度功能，关闭多路径功能。设置载波频率为5061MHz（波道号为600），射频电平为-25dBm，方位角为0°，方位角波束电平设置为+6dB，同步脉冲为与方位角同步。

c) 将频谱分析仪中心频率设置为5061MHz，扫频宽度设置为零，外触发模式，以同步信号作为触发，最先出现的即为前导码信号，将前导码电平设置为参考点，测量波束脉冲峰值点相对于前导码信号的电平差值即为波束电平值，记录至附录A表A.6中；测量旁瓣脉冲峰值点相对于波束脉冲峰值点的电平差值，即为旁瓣电平值，记录附录A表A.6中。

d) 根据附录A表A.6改变信号波束电平值，重复步骤c）~d），测量其余波束电平值；

e) 打开多路径功能，设置主路径方位角波束电平为最小，多路径波束电平为+6dB，多路径波束宽度为0.5°，角度与主路径方位角不同，重复步骤c）~e），测量多路径波束电平值。

7.7 OCI 脉冲特性

7.7.1 OCI脉冲宽度

a) 仪器连接如图 7所示；

b) 设置模拟器为普通进场模式，打开方位角功能，关闭其他角度功能，关闭多路径功能。设置载波频率为5061MHz（波道号为600），射频电平为-25dBm，方位角为0°，同步状态为方位角同步。

c) 以方位角同步信号作为触发，将后OCI电平设置为6dB，其余OCI电平设置为-4dB，观察扇区信号中出现一段电平高于前导码信号的脉冲信号；

d) 利用数字示波器对信号进行数字检波后得到信号包络，测量OCI的上升和下降沿的71%点之间的时间间隔，记录为W_{OCI0}；

e) 计算OCI脉冲宽度的误差，记录计算结果至附录A表A.7中；

f) 将后OCI电平设置为-4dB，根据附录A表A.7将其余OCI电平依次设置为7dB，重复步骤c）~d），测量其余OCI脉冲宽度值。

7.7.2 OCI脉冲电平

a) 仪器按照如图 9所示连接。

b) 设置模拟器为普通进场模式，打开方位角功能，关闭其他角度功能，关闭多路径功能。设置载波频率为5061MHz（波道号为600），射频电平为-25dBm，方位角为0°，同步状态为方位角同步，将后OCI电平设置为7dB，其余OCI电平设置为-4dB；

c) 以方位角同步信号作为触发，设置频谱分析仪为外触发方式，中心频率设置为5061MHz，扫频宽度设置为零。在同步触发之后最先出现的即为前导码信号，将前导码电平设置为参考点，测量OCI相对于前导码信号的电平的差值，记录为OCI脉冲电平值P_{OCI0}。

d) 计算OCI脉冲电平的误差，记录计算结果至附录A表A.8中；

e) 根据附录A表A.8改变OCI脉冲电平值，重复步骤c）~d），测量其余脉冲电平值；

f) 将后OCI电平设置为-4dB，根据附录A表A.8改变其余OCI电平值，重复步骤c）~e），测量其余OCI脉冲电平值。

7.8 余隙脉冲特性

7.8.1 余隙脉冲宽度

a) 仪器按照如图 7所示连接。

b) 设置模拟器为普通进场模式，设置载波频率为5061MHz（波道号为600），射频电平为-25dBm，方位角电平为-3dB，同步状态为方位角同步，打开多路径功能，多路径波形设置为余隙脉冲；

c) 以方位角同步信号作为触发，将左右余隙脉冲电平设置为6dB，角度设置为1°，观察“往”“返”扫描波束前后分别出现一个脉冲信号，见图1所示；

d) 利用数字示波器对信号进行数字检波后得到信号包络，测量各个余隙脉冲的上升和下降沿的70.8%点之间的时间间隔，记录为$W_{余0}$。

e) 计算余隙脉冲宽度的误差，记录计算结果至附录A表A.9中。

7.8.2 余隙脉冲电平

a) 仪器连接如图 9所示。

b) 设置模拟器为普通进场模式，设置载波频率为5061MHz（波道号为600），射频

电平为-25dBm，方位角电平为-3dB，同步状态为方位角同步，打开多路径功能，多路径波形设置为余隙脉冲，将左右余隙脉冲电平设置为6dB，角度设置为1°；

c) 以方位角同步信号作为触发，设置频谱分析仪为外触发方式，中心频率设置为5061MHz，扫频宽度设置为零，在同步触发之后最先出现的即为前导码信号，将前导码电平设置为参考点，测量四个余隙脉冲相对于前导码信号电平的差值，记录为余隙脉冲电平值$P_{余0}$。

d) 计算余隙脉冲电平的误差，记录计算结果至附录A表A.10中。

e) 根据附录A表A.10改变余隙脉冲电平值，重复步骤c）~d）测量其余脉冲电平值。

7.9 DPSK调制

7.9.1 幅度平衡

a) 仪器连接如图 9所示。

b) 设置模拟器为普通进场模式，打开方位角功能，关闭其他角度功能，关闭多路径功能。同步脉冲设置为与方位角同步，设置载波频率为5061MHz（波道号为600），射频电平为-17dBm，方位角为0°。

c) 以方位角同步信号作为触发，设置频谱分析仪为外触发方式，中心频率设置为5061MHz，扫频宽度设置为零，调节频谱分析仪垂直刻度、扫描时间和触发延时，使前导码部分的波形能完整显示在屏幕中，使用频谱仪光标差值功能测量前导码中码元间的电平差值最大值作为测量结果记录于附录A表A. 12中。

7.9.2 相位转换时间

a) 仪器连接如仪器连接如图 7所示；

b) 设置模拟器为普通进场模式，打开方位角功能，关闭其他角度功能，关闭多路径功能。同步脉冲设置为与方位角同步，设置载波频率为5061MHz（波道号为600），射频电平为-17dBm，方位角为0°。

c) 使用同步脉冲作为触发，使示波器中得到稳定的波形。

d) 使用示波器数字检波功能对波形进行包络检波。

e) 调节示波器时基和触发延时，使前导码稳定显示在示波器屏幕上并且相位转换点位于示波器中央，如图 10所示。

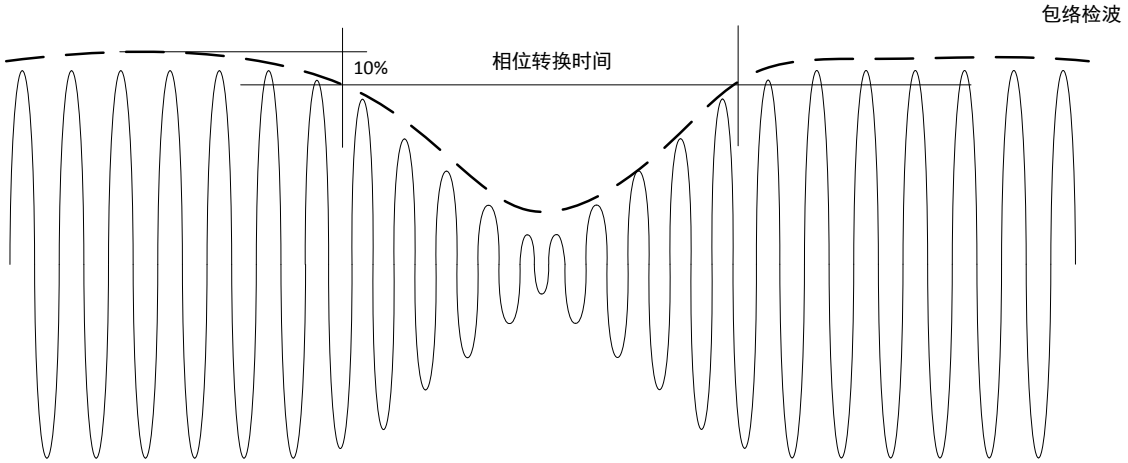

图 10 DPSK 调制相位转换时间测试示意图

f) 使用示波器负脉冲宽度测量功能，测量包络检波信号低于最大幅度10%点处的脉冲宽度，即为相位转换时间，记录于附录A表A. 12中。

7.9.3 180°相移

a) 仪器连接如仪器连接如图 11所示；

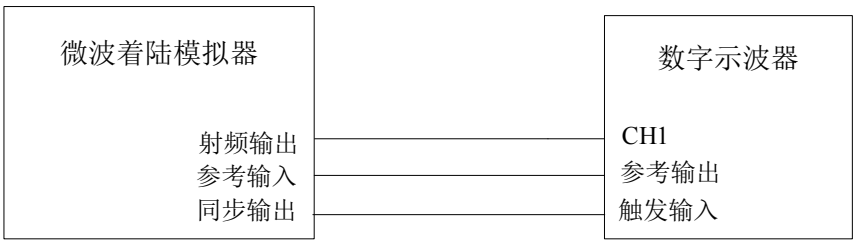

图 11 DPSK 调制 180°相移校准框图

b) 设置模拟器为普通进场模式，打开方位角功能，关闭其他角度功能，关闭多路径功能。同步脉冲设置为与方位角同步，设置载波频率f_c为5031MHz（波道号为500），射频电平为-17dBm，方位角为0°。

c) 使用同步脉冲作为触发，使示波器中得到稳定的波形。

d) 降低示波器采样率，如设置示波器采样率为500Sa/s，此时载波频率变为31MHz；

e) 调节示波器时基和触发延时，使前导码中某个DPSK调制的相位翻转点显示在示波器屏幕中央，左右两边各能显示过渡带以外的多个周期的幅度平稳的载波信号。

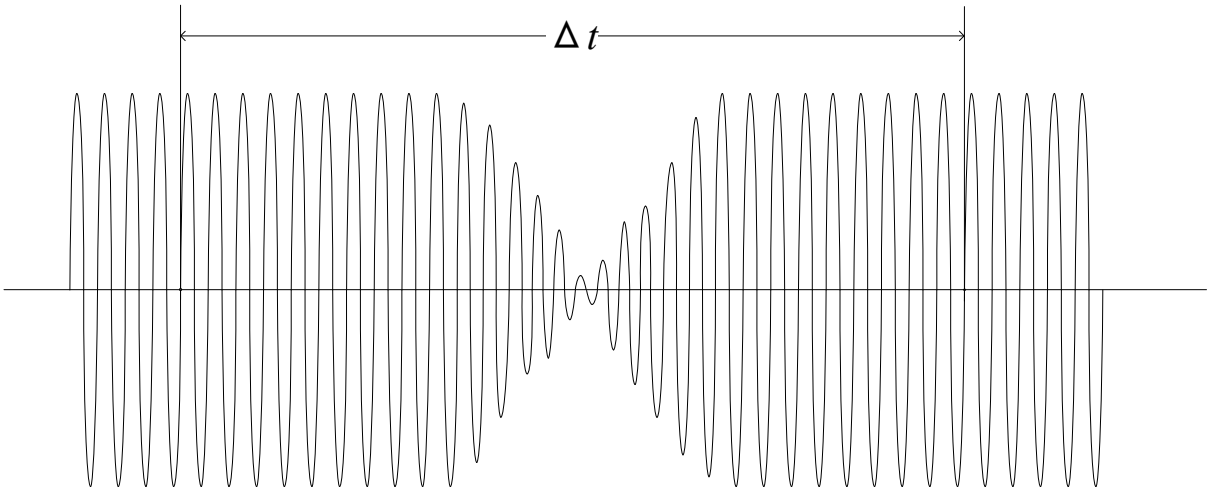

图 12 DPSK 调制 180°相移校准波形示意图

f) 使用示波器ΔTime测量功能测量 n 个上升沿过零点之间时间间隔，如图 12所示，选取时间段需要满足起始点在相位变化前载波幅度处于稳定状态时的某个上升沿过零点，终止点为相位变化后载波幅度处于稳定状态时的某个上升沿过零点。此时测得的时间间隔值为 Δt。利用公式$N=\Delta t\times f_{\mathrm{alias}}$计算所包含的载波周期个数（包含小数部分）。

g) 使用以下公式计算得到实际相移Φ，记录于附录A表A. 12中：

$$\Phi = (N - \lfloor N \rfloor) \times 360° \tag{5}$$

式中：⌊ ⌋ 表示向下取整。

注：如果模拟器没有10MHz参考输入，则f_{alias}需要通过示波器测量出来。

7.10 衰落频率

a) 仪器连接如图 7所示。

b) 将微波着陆模拟器设置为诊断模式，设置主路径和多路径为连续波，主路径电平为-20dBm，多路径调制电平为-10dB，衰落频率为1000Hz。

c) 在数字示波器上观察被测信号，应为每周期八个不连续台阶状的幅度调制信号，如图 13所示。

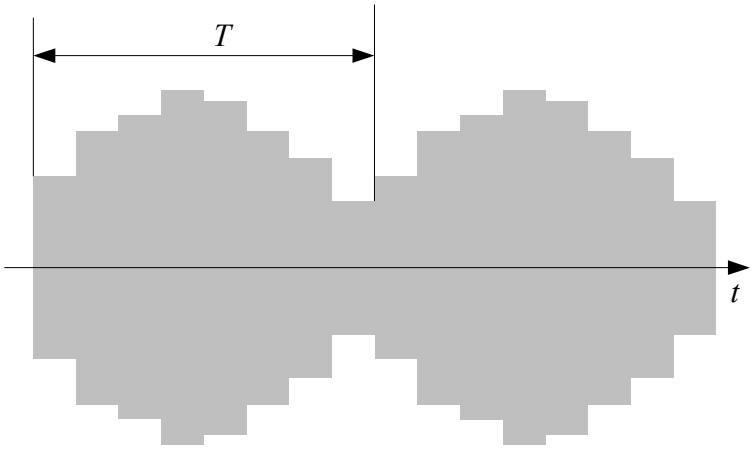

图 13 衰落频率被测射频信号示意图

d) 输入信号通过示波器数字检波后得到信号包络，测量信号包络的重复频率，记录至附录A表A.11中。

e) 根据附录A表A.11改变衰落频率值，重复步骤c)~e)，测量其余衰落频率大小。

7.11 螺旋桨调制

7.11.1 调制频率和占空比

a) 仪器连接如图 14。

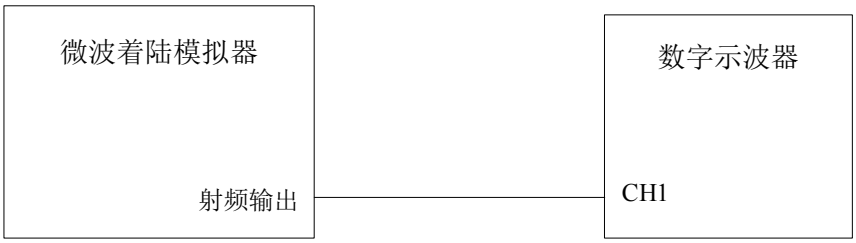

图 14 螺旋桨调制校准框图

b) 将微波着陆模拟器设置为诊断模式，设置主路径为连续波，波道为500，主路径电平为-20dBm，打开螺旋桨调制，且调制频率设置为1Hz。

c) 示波器设置为CH1触发，调节触发电平使信号稳定显示，通过示波器数字检波后得到信号包络。调节时基和触发延时，使屏幕上显示1~2个周期的方波。

d) 使用示波器测量方波包络信号重复频率，记录于附录A表A. 14中。

e) 使用示波器测量方波包络信号占空比，记录于附录A表A. 14中。

7.11.2 高低电平差

a) 仪器连接如图 6所示。

b) 将微波着陆模拟器设置为诊断模式，设置主路径为连续波，波道为500，主路径电平为-20dBm，打开螺旋桨调制，且调制频率设置为1Hz。

c) 设置频谱分析仪中心频率为5031MHz，扫频宽度为零，触发方式为视频触发，

调节触发电平使波形稳定显示。调节扫描时间使屏幕上出现1~2个周期的调制方波，使用差值光标标记高低电平之间的差值，记录于附录A表A. 14中。

7.12 6.75Hz调制

7.12.1 调制频率

a) 仪器连接如图 14。

b) 将微波着陆模拟器设置为诊断模式，设置主路径为连续波，波道为500，主路径电平为-20dBm，打开6.75Hz调制。

c) 示波器设置为CH1触发，调节触发电平使信号稳定显示，通过示波器数字检波后得到信号包络。调节时基和触发延时，使屏幕上显示1~2个周期的方波。

d) 使用示波器测量方波包络信号重复频率，记录于附录A表A. 15中。

7.12.2 高低电平差

a) 仪器连接如图 6所示。

b) 将微波着陆模拟器设置为诊断模式，设置主路径为连续波，波道为500，主路径电平为-20dBm，打开6.75Hz调制。

c) 设置频谱分析仪中心频率为5031MHz，扫频宽度为零，触发方式为视频触发，调节触发电平使波形稳定显示，调节扫描时间使屏幕上出现1~2个周期的调制方波，使用差值光标标记高低电平之间的差值，记录于附录A表A. 15中。

7.13 发播率

a) 仪器连接如图 15所示。

图 15 发播率校准框图

b) 设置模拟器为普通进场模式，打开方位角功能，关闭其他角度功能，关闭多路径功能，设置同步脉冲为与方位角同步。

c) 设置频率计闸门时间为10秒，设置合适的触发电平（建议设置为同步脉冲幅度的一半大小）。

d) 读取频率计测量结果，记录于附录A表A. 16中。

e) 变更模拟器其他角度功能，并且设置相应功能的同步脉冲后，重复d)步骤进行

测量。

8 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

9 复校时间间隔

复校时间间隔建议为1年。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。

附录 A

原始记录参考格式

表 A. 1 输出频率

波道	标称值	实测值	$U(k=2)$
500	5031.0MHz		
501	5031.3MHz		
…			
699	5090.7MHz		

表 A. 2 输出电平

频率	标称值	实测值	$U(k=2)$
5031MHz（波道：500）	-17dBm		
	-20dBm		
	-30dBm		
	…		
	-120dBm		
5061MHz（波道：600）	-17dBm		
	-20dBm		
	-30dBm		
	…		
	-120dBm		
5090.7（波道：699）	-17dBm		
	-20dBm		
	-30dBm		
	…		
	-120dBm		

表 A. 3 剩余调频和剩余调相

频率	项目	实测值	$U(k=2)$
5031MHz（波道：500）	剩余调频		
	剩余调相		
…	…		

表 A. 4 杂散

频率	测量范围	实测值	$U(k=2)$
5031MHz （波道：500）	±（0.3~1.2）MHz		
	±（1.2~30）MHz		
	5120MHz~5250MHz		
	50kHz~12.4GHz		
…	…		

表 A. 5 输出角度

模式	标称值	实测值	$U(k=2)$
方位角	-60°		
	0°		
	59°		
	60°		
高速方位角	-40°		
	0°		
	39°		
	40°		
仰角	27.5°		
	10°		
	1°		
	0°		
反方位角	-40°		
	0°		
	39°		
	40°		
多路径方位角	-60°		
	0°		
	59°		
	60°		

表 A. 6 波束宽度

模式	设置值	标称值	实测值	$U(k=2)$
主路径	0.5°	25μs		
	1°	50μs		
	2°	100μs		
	3°	150μs		
	4°	200μs		
	5°	250μs		
多路径	0.5°	25μs		

	1°	50μs		
	2°	100μs		
	3°	150μs		
	4°	200μs		
	5°	250μs		

表 A. 7 波束电平

项目	标称值	实测值	$U(k=2)$
主路径波束电平	-3dB		
	0dB		
	6dB		
	10dB		
	13dB		
主路径旁瓣电平	-20dB		
多路径波束电平	-14dB		
	-10dB		
	-5dB		
	0dB		
	6dB		
	10dB		
	13dB		

表 A. 8 OCI 脉冲宽度

OCI 脉冲	标称值	实测值	$U(k=2)$
后	100μs		
左	100μs		
右	100μs		

表 A. 9 OCI 脉冲电平

OCI 脉冲	标称值	实测值	$U(k=2)$
后	+7dB		
	+4dB		
	0dB		
	-4dB		
左	+7dB		
	+4dB		
	0dB		
	-4dB		
右	+7dB		
	+4dB		
	0dB		
	-4dB		

表 A. 10 余隙脉冲宽度

余隙脉冲	标称值	实测值	$U(k=2)$
左飞前	50μs		
右飞前	50μs		
左飞后	50μs		
右飞后	50μs		

表 A. 11 余隙脉冲电平

余隙脉冲	标称值	实测值	$U(k=2)$
左飞前	+13dB		
	+6dB		
	0dB		
	-3dB		
右飞前	+13dB		
	+6dB		
	0dB		
	-3dB		
左飞后	+13dB		
	+6dB		
	0dB		
	-3dB		
右飞后	+13dB		
	+6dB		
	0dB		
	-3dB		

表 A. 12 DPSK 调制

频率	项目	实测值	$U(k=2)$
5031MHz（500 波道）	幅度平衡		
	相位转换时间		
	180° 相移		
…	…		

表 A. 13 衰落频率

标称值	实测值	$U(k=2)$
0.5Hz		
1Hz		
1000Hz		

表 A. 14 螺旋桨调制

项目	标称值	实测值	$U(k=2)$
调制频率	1Hz		
	100Hz		

	199Hz		
高低电平差	12dB		
占空比	15%		

表 A. 15 6.75Hz 调制

项目	标称值	实测值	$U(k=2)$
调制频率	6.75Hz		
高低电平差	12dB		

表 A. 16 发播率

功能	标称值	实测值	$U(k=2)$
方位角	13Hz		
仰角	39Hz		
高速方位角	39Hz		
反方位角	6.5Hz		
拉平仰角	39Hz		

附录 B

校准证书内页格式

表 B. 1 输出频率

波道	标称值	实测值	$U(k=2)$
500	5031.0MHz		
501	5031.3MHz		
…			
699	5090.7MHz		

表 B. 2 输出电平

频率	标称值	实测值	$U(k=2)$
5031MHz（波道：500）	-17dBm		
	-20dBm		
	-30dBm		
	…		
	-120dBm		
5061MHz（波道：600）	-17dBm		
	-20dBm		
	-30dBm		
	…		
	-120dBm		
5090.7（波道：699）	-17dBm		
	-20dBm		
	-30dBm		
	…		
	-120dBm		

表 B. 3 剩余调频和剩余调相

频率	功能项	实测值	$U(k=2)$
5031MHz（波道：500）	剩余调频		
	剩余调相		
…	…		

表 B. 4 杂散

频率	测量范围	实测值	$U(k=2)$
5061MHz （波道：600）	±（0.3~1.2）MHz		
	±（1.2~30）MHz		
	5120MHz~5250MHz		
	50kHz~12.4GHz		
…	…		

表 B. 5 输出角度

模式	标称值	实测值	$U(k=2)$
方位角	-60°		
	0°		
	59°		
	60°		
高速方位角	-40°		
	0°		
	39°		
	40°		
仰角	27.5°		
	10°		
	1°		
	0°		
反方位角	-40°		
	0°		
	39°		
	40°		
多路径方位角	-60°		
	0°		
	59°		
	60°		

表 B. 6 波束宽度

模式	设置值	实测值	$U(k=2)$
主路径	0.5°		
	1°		
	2°		
	3°		
	4°		
	5°		
多路径	0.5°		
	1°		

	2°		
	3°		
	4°		
	5°		

表 B. 7 波束电平

项目	标称值	实测值	$U(k=2)$
主路径波束电平	-3dB		
	0dB		
	6dB		
	10dB		
	13dB		
主路径旁瓣电平	-20dB		
多路径波束电平	-14dB		
	-10dB		
	-5dB		
	0dB		
	6dB		
	10dB		
	13dB		

表 B. 8 OCI 脉冲宽度

OCI 脉冲	标称值	实测值	$U(k=2)$
后	100μs		
左	100μs		
右	100μs		

表 B. 9 OCI 脉冲电平

OCI 脉冲	标称值	实测值	$U(k=2)$
后	+7dB		
	+4dB		
	0dB		
	-4dB		
左	+7dB		
	+4dB		
	0dB		
	-4dB		
右	+7dB		
	+4dB		
	0dB		
	-4dB		

表 B. 10 余隙脉冲宽度

余隙脉冲	标称值	实测值	$U(k=2)$
左飞前	50μs		
右飞前	50μs		
左飞后	50μs		
右飞后	50μs		

表 B. 11 余隙脉冲电平

余隙脉冲	标称值	实测值	$U(k=2)$
左飞前	+13dB		
	+6dB		
	0dB		
	-3dB		
右飞前	+13dB		
	+6dB		
	0dB		
	-3dB		
左飞后	+13dB		
	+6dB		
	0dB		
	-3dB		
右飞后	+13dB		
	+6dB		
	0dB		
	-3dB		

表 B. 12 DPSK 调制

频率	项目	实测值	$U(k=2)$
5031MHz（500 波道）	幅度平衡		
	相位转换时间		
	180° 相移		
…	…		

表 B. 13 衰落频率

标称值	实测值	$U(k=2)$
0.5Hz		
1Hz		
1000Hz		

表 B. 14 螺旋桨调制

项目	标称值	实测值	$U(k=2)$
调制频率	1Hz		
	100Hz		

	199Hz		
高低电平差	12dB		
占空比	15%		

表 B. 15 6.75Hz 调制

项目	标称值	实测值	$U(k=2)$
调制频率	6.75Hz		
高低电平差	12dB		

表 B. 16 发播率

功能	标称值	实测值	$U(k=2)$
方位角	13Hz		
仰角	39Hz		
高速方位角	39Hz		
反方位角	6.5Hz		
拉平仰角	39Hz		

附录 C

主要项目校准不确定度评定示例

C.1 输出频率校准不确定度评定

C.1.1 测量方法

使用频率计直接测量模拟器输出的连续波信号频率。例如，使用 FSMR 频率计功能测量 MLS-800 模拟器 500 波道（频率值为 5031MHz）的输出信号频率。

C.1.2 测量模型

输出频率的测量属于直接测量法。因此可以确定测量模型为：

$$f = f_0 \qquad (C.1)$$

f ——被测频率

f_0——频率计示值

C.1.3 不确定来源

不确定度来源有以下 3 项：

(1) 由频率计计数不准引入的不确定度分量 u_1；

(2) 由频率计分辨力引入的不确定度分量 u_2；

(3) 测量重复性引入的不确定度分量 u_3。

C.1.4 标准不确定度评定

C.1.4.1 频率计数器计数不准引入的不确定度分量

频率计的准确度为 1×10^{-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 $u_{1rel}=5.77\times10^{-9}$。

C.1.4.2 频率计数器分辨力引入的不确定度分量

对于频率计，其分辨力为 1 Hz，包含因子为 $k=\sqrt{3}$，则引入的不确定度分量为 $u_2=0.289$ Hz，转换为相对不确定分量为 $u_{2rel}=3\times10^{-10}$。

C.1.4.3 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	5030.9989	5030.9988	5030.9987	5030.9989	5030.9988
次数	6	7	8	9	10

测量结果/MHz	5030.9988	5030.9989	5030.9988	5030.9989	5030.9988

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为：$s(x)$=0.06kHz，取单次测量结果，并转化为相对量，则重复性引入的不确定度分量为：

$$u_{3rel}= s(x)/x=1.1\times10^{-8}$$

C.1.5 合成标准不确定度

表 C. 2 输出频率不确定度分量一览表

分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	频率计数器计数不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	5.77×10^{-9}
u_2	频率计分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	3×10^{-10}
u_3	测量重复性	A	——	——	1.1×10^{-8}

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_{crel}=\sqrt{u_{1r}^2+u_{2r}^2+u_{3r}^2}=1.23\times10^{-8}$$

C.1.6 扩展不确定度

取包含因子 k=2，则 $U_{rel}=2.5\times10^{-8}$

C.2 输出电平校准不确定度评定

C.2.1 测量方法

使用测量接收机的调谐电平测量功能测量微波着陆模拟输出连续波信号的功率电平。例如，使用 FSMR 测量 MLS-800 输出 600 波道连续波信号电平，测量范围-17dBm ~-120dBm，MLS-800 首先输出-17dBm 连续波信号，测量接收机将功率传感器测得功率值校准到调谐电平上，MLS-800 按照 10 dB 步进减小输出电平，在调谐电平功能下测量。以 MLS-800 输出信号的-17dBm、-60dBm、-120dBm 功率为例，进行不确定度评定。

C.2.2 测量模型

输出电平校准属于直接测量，因此可以确定测量模型为：

$$P=P_0 \tag{C.2}$$

P——被测功率

P_0——测量接收机示值

C.2.3 不确定度来源

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) 接收机输入端口失配引入的不确定度分量 u_5；

(6) 接收机调谐电平量程切换引入的不确定度分量 u_6；

(7) 接收机分辨力引入的不确定度分量 u_7；

(8) 测量重复性引入的不确定度分量 u_8。

C.2.4 标准不确定度评定

C.2.4.1 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=0.043dB。

C.2.4.2 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 400nW(k=2)，测量电平为-17dBm 时引入的误差转化为相对形式为 u_2=200nW/0.02mW=0.01,对数形式表示为 $u_2=10\times\lg(1+2\times10^{-4})$=0.043dB。

C.2.4.3 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 240nW，当测量功率为-17dBm(0.02mW)时，则转化为相对形式为 u_3=240nW/0.02mW=0.012,对数形式表示为 $u_3=10\times\lg(1+1.2\times10^{-4})$=0.052dB。

C.2.4.4 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±0.01dB±0.005dB/10dB，则-17dBm、-57dBm、-107dBm 线性度引入的误差分别为 0.01dB、0.03dB、0.055dB。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、0.017dB、0.031dB。

C.2.4.5 接收机输入端口失配引入的不确定度分量 u_5

MLS-800 RF I/O 端口的驻波比为 1.3，转换反射系数为 Γ_g=0.13，功率传感器端口驻波比为 1.2，转换为反射系数为 Γ_l=0.091，根据经典公式，则失配引入的误差为 8.686×max（$|\Gamma_g||\Gamma_l|$）=0.102dB。失配引入的误差服从反正弦分布，包含因子 $k=\sqrt{2}$，因此 $u_5=0.102/\sqrt{2}$=0.072dB。

C.2.4.6 接收机调谐电平量程切换引入的不确定度分量 u_6

根据技术资料，测量-17dBm 发生一次量程切换，测量-57dBm、-107dBm 电平值时会发生两次量程切换，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-17dBm、-57dBm、-107dBm 的不确定度分量分别为 0.003dB、0.006dB、0.006dB。

C.2.4.7 接收机分辨力引入的不确定度分量 u_7

测量电平值的分辨力为 0.001dB，按均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$，则其引入的不确定分量为 u_7=0.0003dB。

C.2.4.8 重复性引入的不确定度分量 u_8

MLS-800 输出 5031MHz 连续波信号，功率-17dBm、-60dBm、-120dBm 重复性测量结果，见表 C. 3

表 C. 3 MLS-800 输出 600 波道的-17dBm、-60dBm、-120dBm 输出电平重复性测量结果

测量-17dBm					
次数	1	2	3	4	5
测量结果/dBm	-17.16	-17.18	-17.16	-17.18	-17.17
次数	6	7	8	9	10
测量结果/dBm	-17.23	-17.18	-17.20	-17.18	-17.20
测量-57dBm					
次数	1	2	3	4	5
测量结果/dBm	-60.26	-60.21	-60.27	-60.28	-60.18
次数	6	7	8	9	10
测量结果/dBm	-60.23	-60.28	-60.25	-60.29	-60.17
测量-117dBm					
次数	1	2	3	4	5
测量结果/dBm	-120.35	-120.22	-120.28	-120.34	-120.36
次数	6	7	8	9	10
测量结果/dBm	-120.31	-120.27	-120.23	-120.23	-120.21

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差分别为 0.021dB、0.043dB、0.057dB，取单次测量结果，则由重复性引入的标准不确定度 u_8分别为：0.02dB、0.04dB、0.06dB。

C.2.5 合成标准不确定度

表 C. 4 不确定度分量一览表

分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	功率传感器校准因子	B	正态	2	0.043dB
u_2	功率传感器校零	B	正态	2	0.043dB

u_3	功率传感器噪声	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.052dB
u_4	接收机线性度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.01dB~0.04dB
u_5	接收机输入端口失配	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.072dB
u_6	接收机调谐电平量程切换	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.003dB
u_7	接收机分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0003dB
u_8	测量重复性	A	--	--	0.02dB~0.06dB

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{8} u_i^2} = （0.11\sim0.14）\text{dB}$$

C.2.6 扩展不确定度

取包含因子 k=2，则 $U=ku_c$=（0.22~0.28）dB。

C.3 剩余调频校准不确定度评定

C.3.1 测量方法

利用测量接收机的调频频偏、调相相偏测量功能测量模拟器输出连续波信号的剩余调频、剩余调相。例如，使用测量接收机FSMR测量MLS-800输出5031MHz连续波信号的剩余调频。剩余调相可以参照评定。

C.3.2 测量模型

$$y = y_0 \tag{C.3}$$

y——被测剩余调频

y_0——测量接收机示值

C.3.3 不确定度来源

则经过分析，不确定度来源主要有以下 3 项：

（1） 测量接收机调频频偏测量不准引入的不确定度 u_1；

（2） 测量接收机本底剩余调频引入的不确定度 u_2；

（3） 测量重复测量引入的不确定度 u_3。

C.3.4 标准不确定度评定

C.3.4.1 测量接收机调制频率测量不准引入的不确定度

查接收机FSMR技术说明书，当频率为5031MHz~5091MHz时，调频测量准确度为±1%，通过测量可知，剩余调频测量值<100Hz，因此准确度为±1Hz，取a=1Hz，按均

匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则u_1=0.58Hz。

C.3.4.2 测量接收机本底剩余调频引入的不确定度

查接收机FSMR技术说明书，当频率为5031MHz~5091MHz时，接收机本底剩余调频为4Hz。取a=4Hz，按均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则u_2=2.4Hz。；

C.3.4.3 重复测量引入的不确定度

重复性测量结果如下表所示：

表 C. 5 剩余调频测量重复性

次数	1	2	3	4	5
测量结果/Hz	40.5	41.6	44.3	47.2	38.5
次数	6	7	8	9	10
测量结果/Hz	50.6	48.8	51.4	58.8	49.1

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为：$s(x)$=6Hz，取单次测量结果，则由重复性引入的标准不确定度为：u_3=6Hz。

C.3.5 合成标准不确定度

表 C. 6 剩余调频不确定度分量一览表

分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	测量接收机调频频偏测量不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.58Hz
u_2	测量接收机本底剩余调频	B	均匀	$\sqrt{3}$	2.4Hz
u_3	测量重复性	A	——	——	6Hz

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} u_i^2} = 7\text{Hz}$$

C.3.6 扩展不确定度

取包含因子k=2，则$U=ku_c$=14Hz（k=2）。

C.4 杂散校准不确定度

C.4.1 测量方法

利用频谱分析仪测量微波着陆模拟器的信号杂散。例如使用 FSMR 频谱分析仪功能测量 MLS-800 输出 600 波道信号在偏离载波（+0.3MHz~1.2MHz）点的最大电平值。

C.4.2 测量模型

$$s = s_0 \qquad \text{（C.4）}$$

s——被测杂散

s_0——频谱分析仪示值

C.4.3 不确定度来源

经过分析，不确定度来源有以下 4 项：

(1) 频谱分析仪幅度频响引入的不确定度分量 u_1；

(2) 频谱分析仪幅度非线性引入的不确定分量 u_2；

(3) 频谱分析仪测量结果分辨力引入的不确定度分量 u_3；

(4) 测量重复性引入的不确定度分量 u_4。

C.4.4 标准不确定度评定

C.4.4.1 频谱分析仪幅度频响引入的不确定度分量 u_1；

查 FSMR 说明书，频谱分析仪频响引入的标准的不确定度分量 u_1=0.60dB。

C.4.4.2 频谱分析仪幅度非线性引入的不确定分量 u_2；

查 FSMR 说明书，频谱分析仪 RBW≤100kHz，S/N>20dB，电平测量值-70dB~0dB 时，不确定度分量 u_2=0.06dB。

C.4.4.3 频谱分析仪测量结果分辨力引入的不确定度分量 u_3；

频谱分析仪 Marker 相对电平测量值分辨力为 0.01dB，按照均匀分布，则半宽度 a =0.005dB，包含因子为 $k=\sqrt{3}$，则 $u_3=a/k$=0.003dB

C.4.4.4 测量重复性引入的不确定度分量 u_4

重复性测量结果如下表所示：

表 C. 7 杂散重复性测量结果

次数	1	2	3	4	5
测量结果/dBc	-71.9	-71.5	-70.8	-72.3	-71.2
次数	6	7	8	9	10
测量结果/dBc	-70.6	-71.5	-71.3	-71.8	-70.8

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为：$s(x)$=0.54dB，取单次作为测量结果，则重复性引入的不确定度分量为：

$$u_4= s(x)=0.54\text{dB}$$

C.4.5 合成标准不确定度

表 C. 8 杂散不确定度分量一览表

分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	频谱分析仪幅度频响	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.60dB

u_2	频谱分析仪幅度非线性	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.06dB
u_3	频谱分析仪测量结果分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.03dB
u_4	测量重复性	A	——	——	0.54dB

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{4} u_i^2} = 0.8\text{dB}$$

C.4.6 扩展不确定度

取包含因子 k=2，则 $U=ku_c$=1.6dB。

C.5 输出角度校准不确定度

C.5.1 测量方法

利用数字示波器测量输出角度往返波束之间的时间间隔 t，再通过计算转化为角度 θ。例如，使用数字示波器 DSO91304A 测量模拟器 600 波道输出的 60°方位角。

C.5.2 测量模型

方位角的计算公式为：

$$\theta = \frac{T-t}{2} \times a \qquad \text{（C.5）}$$

a—扫描速度比例常数，为 0.02(°)/μs；

T—相对 0°时往返扫描波束之间的时间间隔，测量方位角时 T=6800μs；

t—往返扫描波束的时间间隔。

根据公式 C.5，对 t 求导数即得到时间测量不确定度与角度测量不确定度之间的转换关系：

$$d\theta = \frac{a}{2}dt \qquad \text{（C.6）}$$

注：t 的单位为 μs

则灵敏度系数 $c_1=\frac{a}{2}$=0.01(°)/μs。

C.5.3 不确定度来源

经过分析，示波器测量波束间时间间隔的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) 示波器抖动噪声基底引入不确定度 u_2；

(3) 重复测量引入的不确定度 u_3。

C.5.4 标准不确定度评定

C.5.4.1 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：

$$E_{Tbase} = TBA \times \Delta T \quad (C.7)$$

示波器时基准确度为 1×10^{-6}，60°方位角对应的脉冲时间间隔为 800μs，因此：

$$E_{Tbase} = \pm 0.8 \times 10^{-9} s$$

则取区间半宽度为$a = 0.8ns$，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=0.46ns。

C.5.4.2 示波器抖动噪声基底引入的不确定度 u_2

查示波器仪器资料可知：

$$JMF = \pm\frac{5}{16} \times \sqrt{JMF^2{}_{\text{edge1}} + JMF^2{}_{\text{edge2}}} \quad (C.8)$$

$$JMF_{edgeN} = \pm\sqrt{\left(\frac{NF}{A} \times T_r\right)^2 + SJ^2} \quad (C.9)$$

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—噪底

A—信号幅度

T_r—所测脉冲上升时间

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。

模拟器设置输出电平为-17dBm，波束电平为+6dB，则波束脉冲电平为-11dBm，换算电压约为 A=64mV，因此使用 10mV/div 刻度，查技术说明书可得，此时示波器标称噪底为 *NF*=0.54mV。波束脉冲上升时间$T_r = 20$μs，此时采样时钟抖动有效值为 *SJ*=0.5 ps。

带入计算可得：

$$JMF = \pm 74.6\text{ns}$$

则取区间半宽度为$a = 74.6$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_2=43.1ns。

C.5.4.3 重复测量引入的不确定度 u_4

模拟器 600 波道输出 60°方位重复测量结果，见表 C. 9。

表 C. 9 MLS-800 输出 600 波道 60°方位往返波束脉冲间隔重复性测量结果

次数	1	2	3	4	5
测量结果	800.0μs	800.1μs	800.1μs	800.1μs	800.1μs
次数	6	7	8	9	10
测量结果	800.1μs	800.1μs	800.0μs	800.1μs	800.0μs

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为：$s(x)$=48.3ns，取单次测量结果，则由重复性引入的标准不确定度为：u_3=48.3ns

C.5.5 合成标准不确定度

表 C. 10 方位角波束脉冲间隔重复性测量结果

分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	示波器时基不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.46ns
u_2	示波器抖动噪声基底	B	均匀	$\sqrt{3}$	43.1ns
u_3	测量重复测量	A	——	——	48.3ns

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{4} u_i^2} = 64.8ns$$

C.5.6 扩展不确定度

取包含因子 k=2，则时间间隔测量 $U_t=ku_c$=0.13μs。带入公式 C.6 可得，角度测量不确定度为 U_θ=0.0013°(k=2)

C.6 波束宽度校准不确定度

C.6.1 测量方法

使用数字示波器测量检波信号的角度波束脉冲上升、下降沿距离峰值电压-3dB 点之间的脉冲宽度，再通过计算转换为角度。例如，使用 DSO91304A 对模拟器 600 波道输出方位角 1°波束宽度进行校准。

C.6.2 测量模型

其测量模型为：

$$\theta = at \quad \text{（C.10）}$$

a—角度与时间的比例常数，测量方位角时为0.02(°)/μs；

t—被测波束脉冲宽度；

根据测量方法，角度测量转化为时间间隔测量，公式（C.10）对 t 求导数即得到时间测量不确定度与角度测量不确定度之间的转换关系：

$$d\theta = a \times dt \qquad (C.11)$$

注：t 的单位为 μs

则灵敏度系数c_1= a=0.02(°)/μs。

C.6.3 不确定度来源

波束宽度 1°对应时间为 50μs，则经过分析，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) 示波器抖动噪声基底引入不确定度 u_2；

(3) 重复测量引入的不确定度 u_3。

C.6.4 标准不确定度评定

C.6.4.1 示波器时基不准引入的不确定度 u_1

所测波束宽度的时间间隔为 50μs，示波器时基准确度为 1E-6，按照公式 C.7 计算可得 E_{Tbase}：

$$E_{Tbase} = \pm 0.05ns$$

则取区间半宽度为a =0.05ns，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=0.029ns。

C.6.4.2 示波器抖动噪声基底引入不确定度 u_2

根据公式 C.8 和公式 C.9 进行计算，模拟器设置输出电平为-17dBm，波束电平为+6dB，则波束脉冲电平为-11dBm，换算电压约为 A=64mV，因此使用 10mV/div 刻度，查技术说明书可得，此时示波器标称噪底为 NF=0.54mV。此时波束脉冲上升/下降时间 $T_{rf} = 40$μs，此时采样时钟抖动有效值为 SJ=0.5ps。

带入计算可得：

$$JMF = \pm 0.15\mu s$$

则取区间半宽度为$a = 0.15$μs，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_2=0.09μs。

C.6.4.3 重复测量引入的不确定度 u_3

MLS-800 输出 600 波道方位角 1°波束宽度（50μs）重复性测量结果，见表 C. 11。

表 C. 11 方位角 1°波束宽度测量重复性

次数	1	2	3	4	5
测量结果/μs	47.2μs	47.3	47.2	47.2	47.3
次数	6	7	8	9	10
测量结果/μs	47.3	47.4	47.2	47.4	47.3

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为：$s(x)$=0.078μs，取单次测量结果，则由重复性引入的标准不确定度为：u_3=0.08μs

C.6.5 合成标准不确定度

表 C. 12 波束宽度不确定度分量一览表

分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	示波器时基不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.029ns
u_2	示波器抖动噪声基底	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.09μs
u_3	测量重复测量	A	——	——	0.08μs

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} u_i^2} = 0.118\mu s$$

C.6.6 扩展不确定度

取包含因子 k=2，则 $U=ku_c$=0.24μs。

带入公式(C.11)可得，角度测量不确定度为 U_θ=0.02×0.24=0.01°(k=2)。

C.7 余隙脉冲宽度校准不确定度评定

C.7.1 测量方法

利用数字示波器对信号进行数字检波后得到信号包络，直接测量微波着陆模拟器的余隙脉冲宽度。例如，使用示波器DSO91304A测量MLS-800模拟器输出600波道方位角信号的50μs左飞前余隙脉冲宽度。OCI脉冲宽度、DPSK相位转换时间不确定度可以参照评定。

C.7.2 测量模型

对信号包络解调后，使用示波器测量功能直接测量余隙脉冲上升、下降沿距离峰值电压-3dB点之间的脉冲宽度。其测量模型为：

$$T=T_0 \tag{C.12}$$

T ——被测脉冲宽度

T_0 ——示波器示值

C.7.3 不确定度来源

则经过分析，校准不确定度来源主要有以下 3 项：

(1) 示波器时基不波束宽度准引入的不确定度 u_1；

(2) 示波器抖动噪声基底引入不确定度 u_2；

(3) 测量重复测量引入的不确定度 u_3。

C.7.4 标准不确定度评定

C.7.4.1 示波器时基不准引入的不确定度

所测余隙脉冲宽度时间间隔为 50μs，因此：

$$\mathrm{E_{Tbase}} = \pm 0.05ns$$

则取区间半宽度为a =0.05ns，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=0.029ns。

C.7.4.2 示波器抖动噪声基底引入不确定度

C.7.4.3 重复测量引入的不确定度

MLS-800 输出 600 波道余隙脉冲宽度（50μs）重复性测量结果，如下表所示：

表 C. 13 余隙脉冲宽度（左飞前）测量重复性

次数	1	2	3	4	5
测量结果/μs	46.2	46.3	46.2	46.2	46.3
次数	6	7	8	9	10
测量结果/μs	46.3	46.4	46.2	46.4	46.3

C.7.5 合成标准不确定度

表 C. 14 余隙脉冲宽度（左飞前）测量不确定度分量一览表

分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	示波器时基不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.029ns
u_2	示波器抖动噪声基底	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.011μs
u_3	测量重复测量	A	——	——	0.08μs

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} u_i^2} = 0.09\mu s$$

C.7.6 扩展不确定度

取包含因子k=2，则$U=ku_c$=0.18μs（k=2）。

C.8 波束电平校准不确定度评定

C.8.1 测量方法

使用频谱分析仪在零扫宽将信号检波后，测量脉冲信号两高低电平之间的电平差值。例如使用 FSMR 频谱分析仪功能测量 MLS-800 模拟器 5061MHz（波道号为 600）方位角波束脉冲相对于前导码的电平差，波束电平设置为 10dB。OCI 脉冲电平、余隙脉冲电平、DPSK 调制幅度平衡、6.75Hz 调制高低电平差，螺旋桨调制高低电平差的测量不确定度可以参照评定。

C.8.2 测量模型

脉冲电平测量属于直接测量，因此建立如下不确定度评定测量模型：

$$A=A_0 \tag{C.13}$$

A ——被测脉冲电平差

A_0 ——频谱分析仪显示值

C.8.3 不确定度来源

通过分析，不确定度来源主要分为以下 2 个方面：

(1) 频谱分析仪线性度引入的不确定度 u_1；

(2) 重复测量引入的不确定度 u_2；

C.8.4 标准不确定度评定

C.8.4.1 频谱分析仪线性度引入的不确定度

查接收机 FSMR 技术说明书，根据测量相对电平值<20dB，因此线性度引入的不确定度 u_2=0.1dB

C.8.4.2 重复测量引入的不确定度

重复性测量结果，见表 C. 15。

表 C. 15 方位波束电平重复性测量结果

次数	1	2	3	4	5
测量结果	10.2dB	10.2dB	10.1dB	10.2dB	10.2dB
次数	6	7	8	9	10
测量结果	10.1dB	10.2dB	10.2dB	10.2dB	10.1dB

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为：$s(x)$=0.05dB，取单次测量结果，则由重复性引入的标准不确定度为：u_2=0.05dB

C.8.5 合成标准不确定度

表 C. 16 波束宽度不确定度分量一览表

分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	频谱分析仪线性度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.06dB
u_2	测量重复测量	A	——	——	0.05dB

以上各不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{2} u_i^2} = 0.08\text{dB}$$

C.8.6 扩展不确定度

取包含因子 k=2，则 $U=ku_c$=0.2dB。

C.9 衰落频率校准不确定度评定

C.9.1 测量方法

使用数字示波器对待测射频信号进行数字检波后得到信号包络，测量信号包络的重复周期 t，再转化为频率f。例如使用数字示波器DSO91304A测量模拟器输出1000Hz衰落频率。螺旋桨调制频率、6.75Hz调制频率的不确定度可以参照评定。

C.9.2 测量模型

根据测量方法，可以确定测量模型为：

$$f = \frac{1}{t} \tag{C.14}$$

对 t 求导数可得：

$$df = -\frac{1}{t^2}dt$$

等式两边除以 f 可转化为相对：

$$\frac{df}{f} = -\frac{dt}{t}$$

可以看出测频相对误差和测时相对误差在数值上相等，其灵敏度系数 c_1=-1。

C.9.3 不确定度来源

则经过分析，不确定度来源主要有以下 3 项：

(1) 示波器时基不准引入的不确定度 u_1；

(2) 示波器抖动噪声基底引入不确定度 u_2；

(3) 重复测量引入的不确定度 u_3。

C.9.4 标准不确定度评定

C.9.4.1 示波器时基不准引入的不确定度

示波器时基准确度为$\pm1\times10^{-6}$，取区间半宽度 $a=1\times10^{-6}$，服从均匀分布，包含因子为 $k=\sqrt{3}$。因此 $u_{1rel}=0.6\times10^{-6}$。

C.9.4.2 示波器抖动噪声基底引入不确定度

根据公式（8）和公式（9）进行计算，模拟器设置输出电平为-20dBm，换算电压约为 A=22mV，因此使用 10mV/div 刻度，查技术说明书可得，此时示波器标称噪底为 NF=0.54mV，此时波束脉冲上升/下降时间不超过$T_r=10\mu s$，此时采样时钟抖动有效值为 SJ=0.5ps。

带入计算可得：

$$JMF=\pm0.108\mu s$$

则取区间半宽度为$\boldsymbol{a}=0.108\mu s$，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a/k=0.06μs，所测时间间隔为 1ms，因此转化为相对不确定度为 $u_{2rel}=6\times10^{-5}$。

C.9.4.3 重复测量引入的不确定度

重复性测量结果如下表所示。

表 C. 17 衰落频率测量重复性

次数	1	2	3	4	5
测量结果/Hz	992	992	992	992	992
次数	6	7	8	9	10
测量结果/Hz	992	992	992	993	992

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为：$s(x)$=0.3Hz，取单次测量结果，则由重复性引入的标准不确定度为：u_3=0.3Hz，$u_{3rel}=3\times10^{-4}$。

C.9.5 合成标准不确定度

表 C. 18 衰落频率不确定度分量一览表

分量	来源	评定方法	分布	灵敏度系数	k 值	标准不确定度
u_{1rel}	示波器时基不准	B	均匀	-1	$\sqrt{3}$	0.6×10^{-6}
u_{2rel}	示波器抖动噪声基底	B	均匀	-1	$\sqrt{3}$	6×10^{-5}
u_{3rel}	重复测量	A	——	/	——	3×10^{-4}

可以看出 u_{1rel}，u_{2rel}是时间测量不确定度分量，合成时需要转化为频率测量不确定

度分量。则

$$u_{rel}(f)=\sqrt{c_1^2\ （u_{1rel}^2+u_{2rel}^2）}=6\times10^{-5}$$

与 u_{3rel}合成可得:

$$u_{crel}=\sqrt{u^2(f)+u_{3rel}^2}=3\times10^{-4}$$

C.9.6 扩展不确定度

取包含因子k=2，则$U=ku_{crel}$，$U_{rel}=6\times10^{-4}$（k=2）。

C.10　螺旋桨调制占空比校准不确定度评定

C.10.1 测量方法

利用数字示波器的数字检波后得到信号包络，分别测量包络信号的负脉冲宽度 τ 和脉冲周期T，从而得到占空比R。例如，使用示波器DSO91304A测量MLS-800螺旋桨调制100Hz下的占空比。

C.10.2 测量模型

对信号包络解调后，使用示波器测量功能直接测量占空比。建立如下不确定度评定测量模型：

$$R=\frac{\tau}{T}\times100\% \qquad (C.15)$$

R ——被测脉冲占空比

τ ——包络信号的负脉冲宽度

T ——信号周期

方波/脉冲占空比的测量属于间接测量，按照R=τ/T，分别对τ，T求偏导，取相对可得：

$$\frac{\partial R}{R}=\frac{\partial\tau}{\tau};\ \frac{\partial R}{R}=-\frac{\partial T}{T}$$

因此使用相对不确定度时，灵敏度系数c_τ=1,c_T=-1。

C.10.3 不确定度来源

则经过分析，不确定度来源主要有以下 3 项：

(1) 示波器时间测量不准引入的不确定度 u_1；

(2) 示波器分辨力引入不确定度 u_2；

(3) 重复测量引入的不确定度 u_3。

C.10.4 标准不确定度评定

C.10.4.1 示波器时间测量不准引入的不确定度

示波器测量占空比，是通过脉冲宽度测量和脉冲周期测量结果求商。

因此根据误差合成：

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 = c_\tau^2\left(\frac{\Delta\tau}{\tau}\right)^2 + c_T^2\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + 2\rho c_\tau c_T\frac{\Delta\tau}{\tau}\frac{\Delta T}{T} = \left(\frac{\Delta\tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 - 2\rho\frac{\Delta\tau}{\tau}\frac{\Delta T}{T}$$

考虑最差情况，两次为不相关时，此时ρ=0，则

$$\frac{\Delta R}{R} = \pm\sqrt{\left(\frac{\Delta\tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2}$$

考虑求脉冲宽度和求脉冲周期相对不确定度主要来自于时基不准，示波器时基准确度为±1×10^{-6}，则合成后占空比测量相对误差为$\pm\sqrt{2}\times10^{-6}$，取区间半宽度a=$\sqrt{2}$×10^{-6}，服从均匀分布，包含因子为k=$\sqrt{3}$。因此u_{1rel}=0.82×10^{-6}。当R=15%时，u_1=0.000012%，该值可以忽略不计。

C.10.4.2 示波器分辨力引入的不确定度

DSO91304A示波器测量占空比分辨力为0.1%，取区间半宽度a=0.05%，包含因子为k=$\sqrt{3}$，则u_2=0.029%。

C.10.4.3 重复测量引入的不确定度

MLS-800 螺旋桨调制占空比 R=15%，重复性测量结果，见表 C. 19。

表 C. 19 螺旋桨调制测量重复性数据

次数	1	2	3	4	5
测量结果	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%
次数	6	7	8	9	10
测量结果	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.3%

根据贝赛尔公式进行计算可得实验标准偏差为：$s(x)$=0.03%，取单次测量结果，则由重复性引入的标准不确定度为： u_3= $s(x)$=0.03%。

C.10.5 合成标准不确定度

分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	示波器时基不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	0%
u_2	示波器分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.03%
u_3	重复测量	A	——	——	0.03%

上各不确定度分量互不相关，则

$$u_{crel} = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} u_i^2} = 0.05\%$$

C.10.6 扩展不确定度

取包含因子k=2，则U=0.1%（k=2）。