



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—XXXX

## UWB(超宽带)无线通信综合测试仪 校准规范

Calibration Specification of Ultra Wide Band Radio Communication Testers

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局 发布



# UWB(超宽带)无线通信综合测 试仪校准规范

Calibration Specification of Ultra Wide Band  
Radio Communication Testers

JJF XXX-202X

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国信息通信研究院

中国计量科学研究院

参加起草单位：为准(北京)电子科技有限公司

中原工学院

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：**

张培艳（中国信息通信研究院）

牟 丹（中国信息通信研究院）

赵海宁（中国计量科学研究院）

**参加起草人：**

李耀华（为准(北京)电子科技有限公司）

周绍华（中原工学院）

张向阳（中国信息通信研究院）

# 目 录

引言 .....	(II)
1 范围 .....	1
2 概述 .....	1
3 术语 .....	1
4 计量特性 .....	1
5 校准条件 .....	3
5.1 环境条件 .....	3
5.2 校准用设备 .....	3
6 校准项目和校准方法 .....	3
6.1 校准项目 .....	4
6.2 外观及工作正常性检查 .....	5
6.3 内部晶体振荡器频率 .....	5
6.4 射频输出频率 .....	5
6.5 射频输出功率 .....	5
6.6 谐波 .....	6
6.7 非谐波 .....	6
6.8 单边带相位噪声 .....	6
6.9 数字调制参数 .....	7
6.10 占用带宽 .....	7
6.11 频率测量 .....	7
6.12 射频功率测量 .....	7
6.13 数字解调参数 .....	8
6.14 射频端口电压驻波比 .....	9
7 校准结果表达 .....	9
8 复校时间间隔 .....	10
附录 A 原始记录内页推荐格式 .....	11
附录 B 校准证书内页推荐格式 .....	14
附录 C 主要项目校准不确定度评定示例 .....	18
附录 D UWB 技术概述 .....	23

# 引 言

JJF 1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》和 JJF 1001 《通用计量术语及定义》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列规范。

本规范参考以下标准：

IEEE 802.15.4-2020 低速无线网络标准（IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks）。

本规范为首次发布。

# UWB(超宽带)无线通信综合测试仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于 UWB(超宽带)无线通信综合测试仪(简称 UWB 综测仪)的校准。其他具有 UWB(超宽带)相关功能的设备可参照执行。

## 2 概述

UWB 技术的主要特点是高带宽、短脉冲、极低的功率谱密度,可实现厘米级定位精度。越来越多的 UWB 设备应用在手机终端、汽车应用、UWB 及工业 4.0 等领域,包括室内定位、移动数据共享、安全支付、资产跟踪、车载定位、无钥匙进入、智能家居和智能工厂等典型应用场景中。

UWB 综测仪用于测量 UWB 终端的发射信号和接收信号性能参数,是由内部晶体振荡器、信号发生模块、信号分析模块等功能模块构成的综合测试仪器,在 UWB 终端生产、研发和测试过程中用于功率、频谱、调制等参数的测试。

## 3 术语

### 3.1 归一化均方根误差 normalized root mean square error(NRMSE)

用来表征发射信号调制质量的参数,公式为:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{|P_i - \bar{P}|^2}{\bar{P}^2}} \quad (1)$$

式中:  $NRMSE$ ——归一化均方根误差;

$P_i$ ——去除频率偏移和极性后的脉冲幅度, UWB 帧结构同步头中的第一个  $\mu s$  被视为发射机的设置时间并被忽略;

$\bar{P}$ ——平均脉冲幅度。

## 4 计量特性

### 4.1 内部晶体振荡器

频率: 10 MHz;

最大允许误差:  $\pm 1.0 \times 10^{-8}$ 。

### 4.2 信号发生模块

#### 4.2.1 射频输出频率

范围: 100 MHz~11 GHz;

最大允许误差:  $\pm 1.0 \times 10^{-8}$ 。

#### 4.2.2 射频输出功率

范围: -120 dBm~+15 dBm;

最大允许误差:  $\pm 0.5$  dB。

#### 4.2.3 谐波:

二次谐波:  $\leq -25$  dBc;

三次谐波:  $\leq -25$  dBc;

二分之一次谐波:  $\leq -40$  dBc。

#### 4.2.4 非谐波: $\leq -50$ dBc。

#### 4.2.5 单边带相位噪声: $\leq -120$ dBc/Hz(偏置频率 100 kHz)。

#### 4.2.6 数字调制参数

##### 4.2.6.1 归一化均方根误差

范围: (0.2~25)%;

最大允许误差:  $\pm 1.5\%$ 。

##### 4.2.6.2 频率误差

范围:  $\pm 100$  kHz;

最大允许误差:  $\pm 20$  Hz。

##### 4.2.6.3 码片时钟误差

范围:  $\pm 20$  ppm;

测量不确定度:  $0.06$  ppm( $k=2$ )。

##### 4.2.6.4 脉冲主瓣宽度

范围: (0.5~2.0) ns;

测量不确定度:  $0.06$  ns( $k=2$ )。

#### 4.2.7 占用带宽

范围: 400 MHz~1.4 GHz;

最大允许误差:  $\pm 1\%$ 。

### 4.3 信号分析模块

#### 4.3.1 频率测量

范围: 100 MHz~11 GHz;

最大允许误差:  $\pm 1.0 \times 10^{-8}$ 。

#### 4.3.2 射频功率测量

范围: (-110 ~+30 ) dBm;

最大允许误差:  $\pm 0.5$  dB。

#### 4.3.3 数字解调参数

##### 4.3.3.1 归一化均方根误差测量

范围: (0.2~25) %;

最大允许误差:  $\pm 1.5\%$ 。

##### 4.3.3.2 频率误差测量

范围:  $\pm 100$  kHz;

最大允许误差:  $\pm 20$  Hz。

##### 4.3.3.3 码片时钟误差



范围：±20 ppm；

测量不确定度：0.06 ppm( $k=2$ )。

#### 4.3.3.4 脉冲主瓣宽度

范围：(0.5~2.0) ns；

测量不确定度：0.06 ns( $k=2$ )。

#### 4.3.4 射频端口电压驻波比：≤2.0。

注：以上指标仅供参考，不作为符合性判定依据。

## 5 校准条件

### 5.1 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；

其他：周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

### 5.2 校准用设备

#### 5.2.1 频率计

频率范围：10 MHz~11 GHz；

频率最大允许误差：±1.0×10<sup>-9</sup>

注：有外接频标功能，频率准确度高于被检频率一个数量级。

#### 5.2.2 功率计

频率范围：100 MHz~11 GHz；

功率测量范围：(-70 ~ +30) dBm；

功率测量最大允许误差：±3 %。

#### 5.2.3 矢量信号发生器(带 UWB 制式调制功能)

频率范围：100 MHz~11 GHz；

输出功率范围：(-110 ~ +30) dBm；

输出功率最大允许误差：±0.5 dB；

误差矢量幅度最大允许误差：±0.5 %。

注：有外接频标功能，频率准确度优于被检频率一个数量级。使用功率放大器和耦合器可以增大矢量信号发生器的输出功率。

#### 5.2.4 频谱分析仪

频率范围：25 MHz~35 GHz；

功率测量范围：(-130 ~ +20) dBm；

功率测量不确定度：(0.15 ~0.50) dB ( $k=2$ )；

单边带相位噪声：≤-125 dBc/Hz(偏置频率 100 kHz)。

#### 5.2.5 矢量信号分析仪(带 UWB 制式解调功能)

频率范围：100 MHz~11 GHz；

误差矢量幅度测量范围：(0.2~15) %；

误差矢量幅度测量不确定度：(0.3~0.6)% ( $k=2$ )；

频率误差测量范围： $\pm 100$  kHz；

频率误差测量不确定度：8.0 Hz ( $k=2$ )。

### 5.2.6 网络分析仪

频率范围：100 MHz~11 GHz；

方向性：>40 dB；

反射端口回波损耗测量最大允许误差： $\pm 1.5$  dB。

### 5.2.7 功分器

频率范围：100 MHz~11 GHz；

幅度不一致性： $\pm 0.3$  dB。

## 6 校准项目和校准方法

### 6.1 校准项目

校准项目一览表见表 1。

表 1 校准项目一览表

序号	项目名称
1	内部晶体振荡器频率
2	射频输出频率
3	射频输出功率
4	谐波
5	非谐波
6	单边带相位噪声
7	数字调制参数
8	占用带宽
9	频率测量
10	射频功率测量
11	数字解调参数
12	射频端口电压驻波比

### 6.2 外观及工作正常性检查

6.2.1 被校 UWB 综测仪的外观应完好，各开关、按键等调节正常，不应有影响电气性能的机械损伤。

6.2.2 被校 UWB 综测仪应有说明书及配套附件。

6.2.3 被校 UWB 综测仪按技术说明书规定时间预热，预热后应显示正常。

6.2.4 如被校 UWB 综测仪具有自校准功能，按要求对仪器进行自校准。

6.2.5 将检查结果记录于附录 A 表 A.1 中。

### 6.3 内部晶体振荡器频率

6.3.1 仪表连接如图1所示。

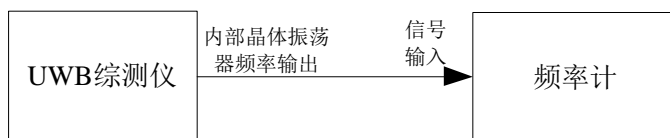


图1 内部晶体振荡器频率校准连接示意图

6.3.2 将 UWB 综测仪内部晶体振荡器频率输出端接到频率计的输入端，由频率计读出内部晶体振荡器频率的实际值。并记录于附录 A 表 A.2。

### 6.4 射频输出频率

6.4.1 仪表连接如图 2 所示。

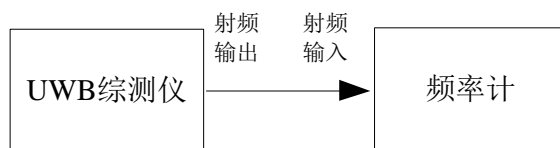


图2 射频输出频率校准连接示意图

6.4.2 设置 UWB 综测仪为发射连续波(CW)模式，设置输出功率为适当值，采用低中高原则从最低到最高改变载波频率覆盖所有 UWB 频段，用频率计测量频率值，并记录于附录 A 表 A.3。

### 6.5 射频输出功率

6.5.1 仪表连接如图 3 所示。



图3 射频输出功率校准连接示意图

6.5.2 设置 UWB 综测仪为发射连续波(CW)模式，采用低中高原则选择输出频率。

6.5.3 按仪表说明书要求，采用低中高原则设置被校 UWB 综测仪的输出功率，用功率计和频谱分析仪测量功率值，将测量结果记录于附录 A 表 A.4。

### 6.6 谐波

6.6.1 仪表连接如图 4 所示。

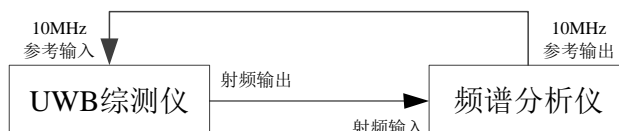


图4 谐波校准连接示意图

6.6.2 设置 UWB 综测仪为发射连续波(CW)模式。按频率范围选择输出频率，并按仪表说明

书设置输出功率(无要求时,输出功率设为最大值)。

6.6.3 用频谱分析仪测量二次谐波与基波间的相对功率值,测量三次谐波与基波间的相对功率值,测量二分之一次谐波与基波间的相对功率值,并将结果记录在附录 A 表 A.5 中。

6.6.4 采用低中高原则改变 UWB 综测仪的输出频率,重复步骤 6.6.2~6.6.3,将测量结果记录在附录 A 表 A.5 中。

## 6.7 非谐波

6.7.1 仪表连接如图 4 所示。

6.7.2 设置 UWB 综测仪为发射连续波(CW)模式,按频率范围选择输出频率,并按仪表说明书设置输出功率(无要求时,输出功率设为最大值)。

6.7.3 用频谱分析仪测出偏离载波(偏离载波的频率值为技术说明书规定值)的最大非谐波与基波间的相对功率值,并记录在附录 A 表 A.6 中。

6.7.4 采用低中高原则改变 UWB 综测仪的输出频率,重复步骤 6.7.2~6.7.3,将测量结果记录在附录 A 表 A.6 中。

## 6.8 单边带相位噪声

6.8.1 仪表连接如图 4 所示。

6.8.2 UWB 综测仪选择发射连续波(CW)模式,按仪表说明书要求设置输出频率和输出功率。

6.8.3 设置频谱分析仪中心频率为 UWB 综测仪的输出频率  $f$ ,按要求设置分辨率带宽  $f_{BW}$  及扫频宽度,若 UWB 综测仪说明书中频率偏移为  $\Delta f$ ,则频谱分析仪的扫频宽度为  $2.5 \times \Delta f$ 。

6.8.4 分别测量载波频率  $f$  的功率  $P$  和偏离载波  $\Delta f$  处的最大相位噪声功率  $P_{\Delta}$ ,并记录在附录 A 表 A.7 中。

6.8.5 使用公式(2)计算单边带相位噪声,并记录在附录 A 表 A.7 中

$$L = P_{\Delta} - P - 10 \times \lg f_{BW} + C \quad (2)$$

式中:  $L$ ——单边带相位噪声, dBc/Hz;

$P$ ——载波频率  $f$  的功率, dBm;

$P_{\Delta}$ ——偏离载波  $\Delta f$  处的最大相位噪声功率, dBm;

$f_{BW}$ ——频谱分析仪分辨率带宽, Hz;

$C$ ——频谱分析仪测量随机噪声的修正值, dB。

6.8.6 改变频率偏移  $\Delta f$ ,重复步骤 6.8.3~6.8.5。

6.8.7 采用低中高原则改变 UWB 综测仪的载波频率,重复步骤 6.8.2~6.8.6,将结果记录在附录 A 表 A.7 中。

## 6.9 数字调制参数

6.9.1 仪表连接如图 5 所示。

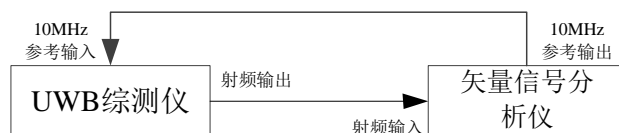


图 5 数字调制参数校准连接示意图

6.9.2 UWB 综测仪选择矢量信号发生器模式，按仪表说明书要求设置输出频率、功率，开启数字调制，其他设置为默认设置。

6.9.3 矢量信号分析仪选择 UWB 解调模式，将中心频率设为 UWB 综测仪的输出频率，参考功率量程设置为自动(或在输入功率功率不过载的情况下，参考功率量程应尽可能接近输入的被测信号)，信道带宽为 BW，在测量结果中读取数字调制参数，具体包括归一化均方根误差、频率误差、码片时钟误差、脉冲主瓣宽度等参数，并记录于附录 A 表 A.8 中。

6.9.4 采用低中高原则改变 UWB 综测仪的载波频率，重复步骤 6.9.2~6.9.3，并将结果记录于附录 A 表 A.8 中。

## 6.10 占用带宽

6.10.1 仪表连接如图 5 所示。

6.10.2 被校 UWB 综测仪选择矢量信号发生器模式，按仪表说明书要求设置输出频率、功率，打开数字调制，其他设置为默认设置。

6.10.3 矢量信号分析仪中心频率设为 UWB 综测仪的输出频率，参考功率量程设置为自动(或者在输入功率功率不过载的情况下，参考功率量程应尽可能接近输入的被测信号)，扫频宽度为 2 倍的信道带宽 BW，选择占用带宽测量模式，在测量结果表中读出占用带宽，并记录于附录 A 表 A.9 中。

6.10.4 采用低中高原则改变 UWB 综测仪的载波频率，重复步骤 6.10.2~6.10.3，并记录于附录 A 表 A.9 中。

## 6.11 频率测量

6.11.1 仪表连接如图 6 所示。

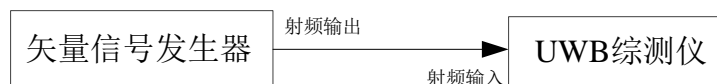


图 6 频率测量校准连接示意图

6.11.2 将矢量信号发生器输出端口通过射频电缆与 UWB 综测仪直接连接。

6.11.3 矢量信号发生器输出连续波信号，设置合适的输出功率  $P_s$ 。

6.11.4 UWB 综测仪选择射频分析仪频率测量模式，设置接收频率为矢量信号发生器输出频率，接收功率大于(或等于) $P_s$ ，在 UWB 综测仪上读出频率测量值，并记录于附录 A 表 A.10 中。

6.11.5 采用低中高原则从最低到最高改变矢量信号发生器的输出频率(覆盖所有 UWB 频段)，重复步骤 6.11.3~6.11.4，并记录于附录 A 表 A.10 中。

## 6.12 射频功率测量

6.12.1 仪表连接如图 7 所示。

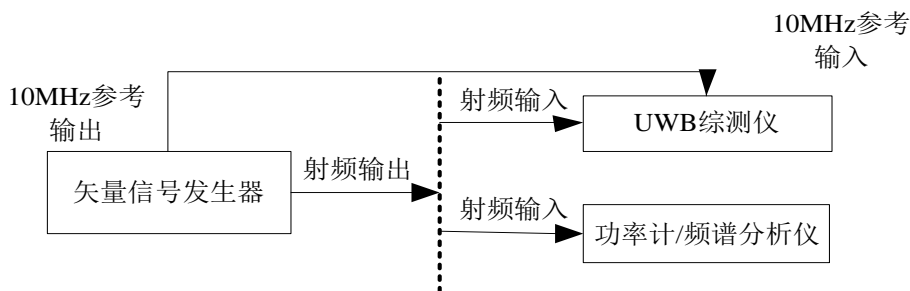


图7 射频功率测量校准连接示意图

6.12.2 将矢量信号发生器输出端口通过射频电缆与功率计/频谱分析仪直接连接。

6.12.3 矢量信号发生器输出连续波信号，设置合适的输出频率。

6.12.4 调节矢量信号发生器输出功率，将功率计/频谱分析仪的指示值  $P_s$  作为实际值，记录于附录 A 表 A.11 中。

6.12.5 矢量信号发生器关闭输出信号，将此射频电缆与 UWB 综测仪的射频输入直接连接，并连接外参考。

6.12.6 UWB 综测仪选择射频分析仪功率测量模式，设置接收频率为矢量信号发生器输出频率，接收功率大于(或等于) $P_s$ ，在 UWB 综测仪上读出功率测量值  $P$ ，并记录于附录 A 表 A.11 中。

6.12.7 采用低中高原则改变矢量信号发生器输出功率和频率，重复步骤 6.12.3~6.12.6，并将测量结果记录于附录 A 表 A.11 中。

### 6.13 数字解调参数

6.13.1 仪表连接如图 8 所示。

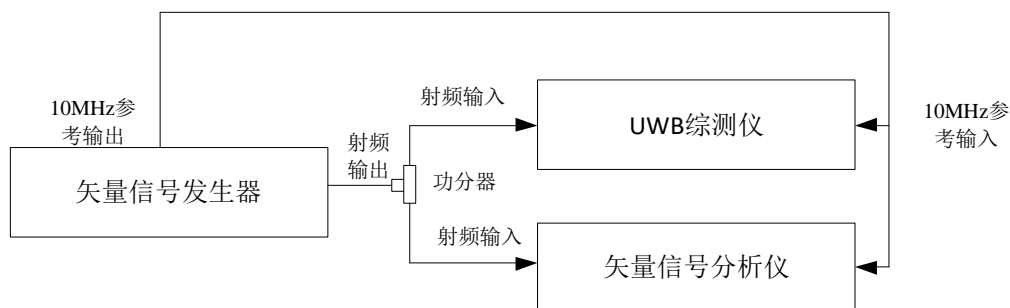


图8 数字解调参数测量校准连接示意图

6.13.2 矢量信号发生器选择 UWB 数字调制模式，按仪表说明书要求设置频率等参数。

6.13.3 矢量信号分析仪和 UWB 综测仪选择 UWB 解调模式，设置频率为矢量信号发生器的输出频率，参考功率量程设置为自动（或在输入功率功率不过载的情况下，参考功率量程应尽可能接近输入的被测信号功率），分别在矢量信号分析仪和 UWB 综测仪的测量结果中读出归一化均方根误差、频率误差、码片时钟误差、脉冲主瓣宽度等解调参数，并记录于附录 A 表 A.12 中。

6.13.4 按仪表说明书要求，采用低中高原则改变矢量信号发生器输出频率，重复步骤

6.13.2~6.13.3, 并记录于附录 A 表 A.12 中。

#### 6.14 射频端口电压驻波比

6.14.1 仪表连接如图 9 所示。

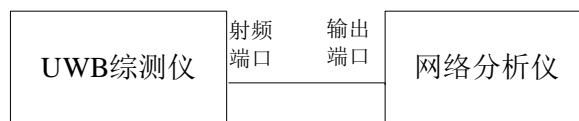


图 9 射频端口电压驻波比校准连接示意图

6.14.2 网络分析仪起始频率和终止频率设为被校 UWB 综测仪射频端口的频率范围, 网络分析仪进行自校准。

6.14.3 关闭 UWB 综测仪射频端口的输出功率, 然后连接到校准面/测试面, 在网络分析仪上读出被测频率处的电压驻波比, 并记录到附录 A 表 A.13 中。

### 7 校准结果表达

UWB 无线通信综合测试仪校准后, 出具校准证书, 校准证书应至少包含以下信息:

- 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和应用有关时, 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

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定, 推荐为 1 年。

## 附录 A

## 原始记录内页推荐格式

表 A.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观及工作正常性检查	

表 A.2 内部晶体振荡器频率

标称值(MHz)	实测值(MHz)	不确定度( $k=2$ )

表 A.3 射频输出频率

标称值(MHz)	实测值(MHz)	不确定度( $k=2$ )

表 A.4 射频输出功率

频率(MHz)	标称值(dBm)	实测值(dBm)	不确定度(dB) ( $k=2$ )



表 A.5 谐波

测试项目	频率(MHz)	实测值(dBc)	不确定度(dB) ( $k=2$ )
二次谐波			
三次谐波			
二分之一次谐波			

表 A.6 非谐波

载波频率 (MHz)	非谐波信号频率 $f_s$ (MHz)	实测值 (dBc)	不确定度 (dB) ( $k=2$ )

表 A.7 单边带相位噪声

载波频率 (MHz)	频偏 $\Delta f$ (kHz)	实测值 (dBc/Hz)	不确定度 (dB) ( $k=2$ )

表 A.8 数字调制参数

载波频率 (MHz)	参数	实测值	不确定度 ( $k=2$ )
	归一化均方根误差(%)		
	频率误差(Hz)		
	码片时钟误差(ppm)		
	脉冲主瓣宽度(ns)		
	....		
	归一化均方根误差(%)		
	频率误差(Hz)		
	码片时钟误差(ppm)		
	脉冲主瓣宽度(ns)		
	....		
	归一化均方根误差(%)		
	频率误差(Hz)		
	码片时钟误差(ppm)		
	脉冲主瓣宽度(ns)		
	....		

表 A.9 占用带宽

测试项目	载波频率 (MHz)	标称值 (MHz)	实测值 (MHz)	不确定度 ( $k=2$ )
占用带宽				

表 A.10 频率测量

频率(MHz)	实际值(MHz)	实测值(MHz)	不确定度( $k=2$ )

表 A. 11 射频功率测量

频率(MHz)	实际值(dBm)	实测值(dBm)	不确定度(dB)( $k=2$ )

表 A. 12 数字解调参数

载波频率 (MHz)	参数	实际值	实测值	不确定度 ( $k=2$ )
	归一化均方根误差(%)			
	频率误差(Hz)			
	码片时钟误差(ppm)			
	脉冲主瓣宽度(ns)			
	....			
	归一化均方根误差(%)			
	频率误差(Hz)			
	码片时钟误差(ppm)			
	脉冲主瓣宽度(ns)			
	....			
	归一化均方根误差(%)			
	频率误差(Hz)			
	码片时钟误差(ppm)			
	脉冲主瓣宽度(ns)			
	....			

表 A. 13 射频端口电压驻波比

频率(MHz)	测试端口	实测值	不确定度 ( $k=2$ )

## 附录 B

## 校准证书内页推荐格式

表 B.1 内部晶体振荡器频率

标称值(MHz)	实测值(MHz)	不确定度( $k=2$ )

表 B.2 射频输出频率

标称值(MHz)	实测值(MHz)	不确定度( $k=2$ )

表 B.3 射频输出功率

频率(MHz)	标称值(dBm)	实测值(dBm)	不确定度(dB) ( $k=2$ )

表 B.4 谐波

测试项目	频率(MHz)	实测值(dBc)	不确定度(dB) ( $k=2$ )
二次谐波			
三次谐波			
二分之一次谐波			

表 B.5 非谐波

载波频率 (MHz)	非谐波信号频率 $f_s$ (MHz)	实测值 (dBc)	不确定度 (dB) ( $k=2$ )

表 B.6 单边带相位噪声

载波频率 (MHz)	频偏 $\Delta f$ (kHz)	实测值 (dBc/Hz)	不确定度 (dB) ( $k=2$ )

表 B.7 数字调制参数

载波频率(MHz)	参数	实测值	不确定度 ( $k=2$ )
	归一化均方根误差(%)		
	频率误差(Hz)		
	码片时钟误差(ppm)		
	脉冲主瓣宽度(ns)		
	....		
	归一化均方根误差(%)		
	频率误差(Hz)		
	码片时钟误差(ppm)		
	脉冲主瓣宽度(ns)		
	....		
	归一化均方根误差(%)		
	频率误差(Hz)		
	码片时钟误差(ppm)		
	脉冲主瓣宽度(ns)		
	....		

表 B.8 占用带宽

测试项目	载波频率 (MHz)	标称值 (MHz)	实测值 (MHz)	不确定度 ( $k=2$ )
占用带宽				

表 B.9 频率测量

频率(MHz)	实际值(MHz)	实测值(MHz)	不确定度( $k=2$ )

表 B. 10 射频功率测量

频率(MHz)	实际值(dBm)	实测值(dBm)	不确定度 (dB) ( $k=2$ )

表 B. 11 数字解调参数

载波频率(MHz)	参数	实际值	实测值	不确定度 ( $k=2$ )
	归一化均方根误差(%)			
	频率误差(Hz)			
	码片时钟误差(ppm)			
	脉冲主瓣宽度(ns)			
	....			
	归一化均方根误差(%)			
	频率误差(Hz)			
	码片时钟误差(ppm)			
	脉冲主瓣宽度(ns)			
	....			
	归一化均方根误差(%)			
	频率误差(Hz)			
	码片时钟误差(ppm)			
	脉冲主瓣宽度(ns)			
	....			

表 B. 12 射频端口电压驻波比

频率(MHz)	测试端口	实测值	不确定度 ( $k=2$ )

## 附录 C

## 主要项目校准不确定度评定示例

## C.1 射频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被校 UWB 综测仪的输出频率。以使用外控参考频标的频率计测试 UWB 综测仪输出的 6489.6 MHz 信号频率为例，进行不确定度评定。

## C.1.2 不确定度来源

- (1) 频率计测量最大允许误差引入的不确定度  $u_1$ ；
- (2) 频率计测量重复性引入的不确定度  $u_2$ ；
- (3) 频率计分辨力引入的不确定度  $u_3$ 。

## C.1.3 不确定度评定

- (1) 频率计测量最大允许误差引入的不确定度  $u_1$

频率计的最大允许误差是由外控参考频标的最大允许误差决定，频率测量最大允许误差  $a_1=1\times 10^{-9}$ ，测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布  $k_1=\sqrt{3}$ 。

则标准不确定度  $u_1=a_1/k_1=5.8\times 10^{-10}$ 。

- (2) 频率计测量重复性引入的不确定度  $u_2$ ；

在被校 UWB 综测仪射频信号发生器输出频率 6489.6MHz，功率-10 dBm，使用频率计对该输出信号重复测量 10 次，测量结果如下表：

表 C.1 射频输出频率测量结果

测量次数	频率计实测值(MHz)
1	6489.600003
2	6489.600002
3	6489.600002
4	6489.600003
5	6489.600002
6	6489.600003
7	6489.600002
8	6489.600002
9	6489.600002
10	6489.600002

$$\text{则单次测量结果的试验标准差 } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} / \bar{X} \approx 7.4 \times 10^{-11}$$

标准不确定度使用试验标准差表示，则  $u_2=s=7.4\times 10^{-11}$ 。

- (3) 频率计分辨力引入的不确定度  $u_3$ 。

由实际频率计指标说明书得到，当测量频率为 6489.6 MHz 时，频率计的频率分辨力为 0.001kHz，则分辨力引入的相对误差  $a_3=1.5\times 10^{-10}$ ，测量值落在该区间内的概率分布为均匀



分布  $k_3=\sqrt{3}$

标准不确定度  $u_3 = a_3 / (2 \times k_3) = 4.4 \times 10^{-11}$

### C.1.4 不确定度合成

表 C.2 射频输出频率不确定度分量综合表

序号	不确定度分量					
	不确定度来源	类型	测量误差或准确度	分布类型	包含因子	标准不确定度
1	频率计最大允许误差	B	$1 \times 10^{-9}$	均匀分布	$\sqrt{3}$	$5.8 \times 10^{-10}$
2	频率计读数重复性	A	/	/	/	$7.4 \times 10^{-11}$
3	频率计分辨力	B	$4 \times 10^{-10}$	均匀分布	$\sqrt{3}$	$4.4 \times 10^{-11}$

合成标准不确定度： $u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^3 u_i^2} \approx 1.0 \times 10^{-9}$

扩展因子  $k=2$ ，扩展不确定度  $U_r = k u_c \approx 2.0 \times 10^{-9}$ 。

## C.2 射频输出功率不确定度评定

### C.2.1 测量方法

UWB 综测仪射频输出功率校准是使用功率计和频谱分析仪直接测量。以使用功率计对被校 UWB 综测仪输出的 6489.6 MHz，-10 dBm 信号功率为例，进行不确定度评定。

### C.2.2 不确定度来源

经分析，不确定度来源如下：

- (1) 功率计参考功率测量不确定度分量引入的不确定度  $u_{1r}$ ；
- (2) 功率计测量过程中的连接及读数重复性引入的不确定度  $u_{2r}$ ；
- (3) 功率计测量过程中由系统失配误差引入的不确定度  $u_{3r}$ ；
- (4) 功率计的功率测量线性度引入的不确定度  $u_{4r}$ ；
- (5) 功率计分辨力引入的不确定度  $u_{5r}$ 。

### C.2.3 不确定度评定

- (1) 功率计参考功率测量不确定度分量引入的不确定度  $u_1$

标准功率计在功率参考点上(0dBm)测量结果的不确定度由上一级的校准证书得到： $U_{p1}=0.8\%(k_1=2)$ 。标准不确定度： $u_{1r}=U_{p1}/k_1=0.40\%$

- (2) 功率计测量过程中的连接及读数重复性引入的不确定度  $u_2$

在被校 UWB 综测仪输出频率 6489.6MHz，功率为 0.1mW 处，使用功率计对 UWB 综测仪重复测量 10 次，测量结果如下表：

表 C.3 UWB 综测仪在输出功率-10 dBm 时, 使用功率计测量结果

测量次数	实测值(dBm)
1	0.0971
2	0.0973
3	0.0976
4	0.0967
5	0.0974
6	0.0983
7	0.0974
8	0.0975
9	0.0974
10	0.0972

$$\text{则单次测量结果的实验标准差 } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.00042 \text{ mW}$$

标准不确定度使用实验标准差表示, 则  $u_2=s=0.00042\text{mW}$ , 换算成相对值为:  
 $u_{2r}=0.00042/0.1=0.0042$ 。

(3) 功率计测量过程中由系统失配误差引入的不确定度  $u_3$

根据仪表的指标说明书得到, 功率探头输入端口电压驻波比 $<1.1$ , 即 $|\Gamma_s|=0.0476$ ; 被测 UWB 综测仪输入输出端口电压驻波比 $\leq 1.5$ , 即 $|\Gamma_u|=0.2$ , 则失配误差  $a_3=2\times 0.0476\times 0.2=0.019$ , 测量值落在该区间内的概率分布为反正弦分布  $k_3=\sqrt{2}$

标准不确定度  $u_{3r}=a_3/k_3\approx 0.013$

(4) 功率计的功率测量线性度引入的不确定度  $u_4$

根据功率计和功率探头的指标说明书, 测量线性度最大允许误差  $a_4=0.03\text{dB}$ , 换算成相对误差即  $0.0069$ , 测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布  $k_4=\sqrt{3}$

标准不确定度分量  $u_{4r}=a_4/k_4\approx 0.0040$

(5) 功率计分辨力引入的不确定度  $u_5$

功率计分辨力为  $0.01\text{dB}$ , 其一半为  $0.005\text{dB}$ , 按均匀分布, 则标准不确定度  $u_{5r}=a_5/k_5\approx 0.0007$ 。

## C.2.4 不确定度合成

## (1) 不确定度分量综合表

表 C.4 UWB 综测仪输出功率在-10dBm 处，不确定度分量综合表

序号	不确定度分量					
	不确定度来源	类型	测量误差或准确度	分布类型	包含因子	标准不确定度
1	功率计参考功率测量	B	0.034dB	/	2	0.40
2	功率计校准过程中的连接及读数重复性	A	/	/	/	0.0042
3	功率计校准过程中系统失配	B	0.0826dB	反正弦	$\sqrt{2}$	0.013
4	功率计的功率测量线性度	B	0.03dB	均匀	$\sqrt{3}$	0.0040
5	功率计分辨力引入的不确定度	B	0.01dB	均匀	$\sqrt{3}$	0.0007

## (2) 合成标准不确定度

以上不确定度分量彼此不相关，则

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u_i^2} = 1.5\%$$

即  $u=0.065\text{dB}$

## (3) 扩展不确定度

扩展因子  $k=2$ ，扩展不确定度  $U$  为： $U=k \times u=2 \times 0.065 \approx 0.13 \text{ dB}$

## C.3 归一化均方根误差(NRMSE)校准不确定度评定

## C.3.1 测量方法

UWB 综测仪 NRMSE 的校准是使用矢量信号分析仪直接测量。以使用矢量信号分析仪测试 UWB 综测仪输出的中心频率 6489.6 MHz，功率-10 dBm 的 UWB 调制信号为例，进行不确定度评定。

## C.3.2 不确定度来源

- (1) 矢量信号分析仪测量最大允许误差引入的标准不确定度分量  $u_1$ ；
- (2) 矢量信号分析仪的测量分辨力误差引入的标准不确定度分量  $u_2$ ；
- (3) 校准过程中测量重复性引入的不确定度  $u_3$ 。

## C.3.3 不确定度评定

- (1) 矢量信号分析仪测量最大允许误差引入的标准不确定度分量  $u_1$

由矢量信号分析仪的测量最大允许误差  $a_1=0.50\%$ ，测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布  $k_1=\sqrt{3}$ 。

则标准不确定度  $u_1= a_1/ k_1=0.29\%$ 。

- (2) 矢量信号分析仪的测量分辨力误差引入的标准不确定度分量  $u_2$

由矢量信号分析仪的指标说明书得到测量分辨力指标为 0.01%，测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布  $k=\sqrt{3}$ ，标准不确定度分量为  $u_2=0.005\%/ k=0.0029\%$ 。

- (3) 校准过程中测量重复性引入的不确定度  $u_3$

UWB 综测仪输出 UWB 调制信号，频率 6489.6 MHz，功率-10 dBm 处，使用矢量信号分析仪对 UWB 综测仪重复测量 10 次，测量结果如下：

表 C.5 UWB 制式 NRMSE 测量结果

测量次数	NRMSE 实测值(%)
1	0.68
2	0.67
3	0.65
4	0.72
5	0.69
6	0.68
7	0.73
8	0.72
9	0.70
10	0.66

则单次测量结果的试验标准差  $s$ ，标准不确定度使用试验标准差表示，则  $u_3=s=0.03\%$

#### C.3.4 不确定度合成

序号	不确定度分量					
	不确定度来源	类型	测量误差或准确度	分布类型	包含因子	标准不确定度
1	矢量信号分析仪测量最大允许误差	B	0.50%	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.29%
2	矢量信号分析仪的测量分辨力误差	B	0.01%	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.0029%
3	校准过程中测量重复性	A	/	/	/	0.03%

各标准不确定度分量互不相关，则

$$\text{合成标准不确定度 } u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^2 u_i^2} = 0.29\%$$

扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，扩展不确定度  $U = k \times u_c = 0.58\%$

## 附录 D

# UWB 技术概述

## D.1 引言

UWB（Ultra-Wideband）超宽带技术作为一种极具潜力的无线通信技术，凭借其独特的优势，如高传输速率、强抗多径能力、高精度定位等，在众多领域得到了广泛应用。UWB 超宽带测试仪作为评估和验证 UWB 系统性能的关键工具，其调制方式对测试仪的性能和测量精度起着决定性作用。深入研究 UWB 超宽带测试仪的调制方式，对于优化测试仪设计、提升测量准确性以及推动 UWB 技术的进一步发展具有重要意义。

UWB 所谓的超宽频区别于其它近场通信技术可总结为时域上跳跃，频域上矮胖。如下图 D1 所示。

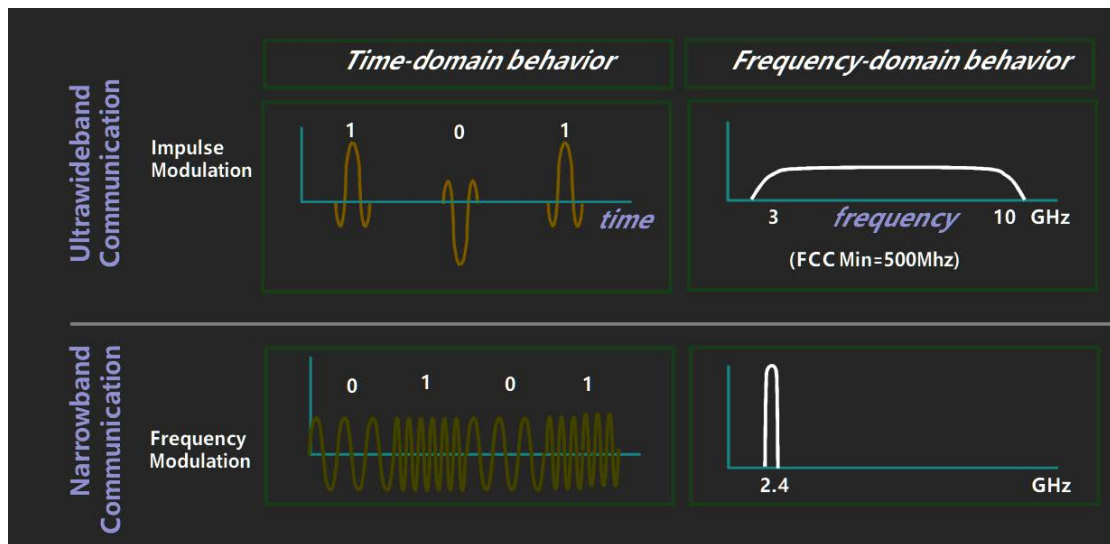


图 D1 超宽带示意图

## D.2 UWB 技术概述

### 2.1 UWB 的定义与特点

UWB 技术通过发送和接收纳秒级甚至皮秒级的窄脉冲来实现信息传输，其信号带宽通常大于 500MHz，相对带宽（信号带宽与中心频率之比）大于 20%。这种独特的信号形式赋予了 UWB 技术诸多显著特点。首先，UWB 信号的极窄脉冲特性使其能够实现极高的时间分辨率，从而为高精度定位和测距应用提供了有力支持。其次，UWB 技术在较宽的频谱范围内分布能量，发射功率谱密度极低，具有良好的隐蔽性和抗干扰能力。此外，由于 UWB 信号的带宽极宽，多径信号在时间上易于分离，使得 UWB 系统在复杂多径环境下仍能保持稳定的通信性能，展现出卓越的抗多径衰落能力。

### 2.2 UWB 的应用领域

UWB 技术的独特优势使其在多个领域展现出广阔的应用前景。在定位与跟踪领域，UWB 高精度定位系统被广泛应用于室内外人员和资产的实时定位，如智能工厂中的设备管理、仓储物流中的货物追踪以及大型场馆内的人员引导等场景，能够实现亚米级甚至更高精度的定位，为提高生产效率和管理水

平提供了可靠手段。在通信领域，UWB 技术适用于短距离高速数据传输，如消费电子设备之间的文件快速共享、无线高清视频传输等，可满足用户对高速、便捷数据通信的需求。此外，UWB 技术在雷达探测、医疗监测等领域也有重要应用，如 UWB 雷达可用于穿墙探测、生命体征监测等，为相关领域的技术发展和应用创新带来了新的机遇。

## D.3 UWB 超宽带测试仪调制方式分类

### 3.1 脉冲调制

#### 3.1.1 脉位调制（PPM-Pulse Position Modulation）

PPM 是一种利用脉冲位置承载数据信息的调制方式。在 PPM 调制过程中，首先系统使用伪随机（PN）码生成器产生一系列脉冲，这些脉冲的间隔由 PN 码控制，可实现时间上的跳变（跳时）。每个脉冲周期会被分为多个相等的时间片，信息比特决定了每个时间片内脉冲是否存在。例如在二进制 PPM（2PPM）中，一个脉冲重复周期内脉冲有两个可能的位置，分别对应二进制数据“0”和“1”；多进制 PPM（MPPM）则根据进制数的不同，脉冲在一个周期内有更多可能的位置，如下图 D2 所示。根据相邻脉位之间距离与脉冲宽度的关系，PPM 又可分为部分重叠的 PPM 和正交 PPM（OPPM）。在部分重叠的 PPM 里，为保证系统传输可靠性，常选择相邻脉位互为脉冲自相关函数的负峰值点，以最大化相邻符号的欧氏距离。而在 OPPM 中，通常以脉冲宽度为间隔确定脉位。PPM 调制仅需根据数据符号控制脉冲位置，无需进行脉冲幅度和极性的复杂控制，便于以较低的复杂度实现调制与解调，这使得 PPM 成为早期 UWB 系统广泛采用的调制方式之一。然而，PPM 信号为单极性，其辐射谱中往往存在幅度较高的离散谱线，这可能导致信号难以满足特定的频谱要求，并且会降低功率利用率。

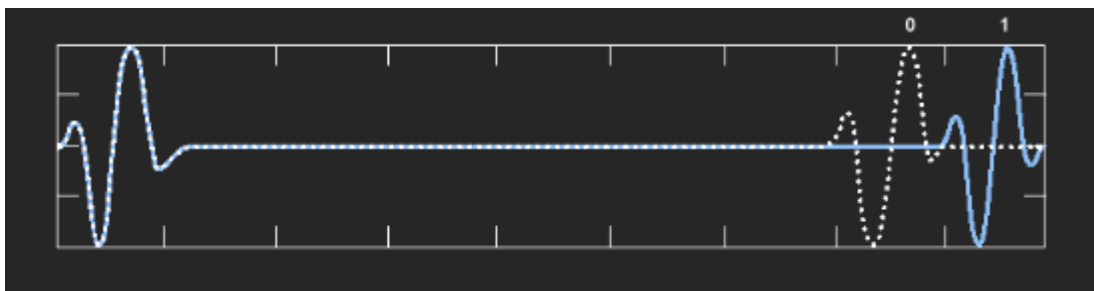


图 D2 脉位调制示意图

#### 3.1.2 脉幅调制（PAM-Pulse Amplitude Modulation）

PAM 是通过用信息符号控制脉冲幅度来实现数据传输的调制方式。采用 PAM 调制时，信息直接触发超宽带脉冲信号发生器以产生超宽带脉冲。在传统 UWB 技术中，PAM 可分为改变脉冲幅度极性和仅改变脉冲幅度绝对值大小两种情况，通常所说的 PAM 一般指仅改变脉冲幅度绝对值的情况，类似于通断键控（OOK-On-Off Keying）。具体过程为，数字信号“1”驱动信号发生器产生一个较大幅度的超宽带脉冲，数字信号“0”则驱动信号发生器产生一个较小幅度的超宽带脉冲，如下图 D3 所示。与 PPM 类似，PAM 调制也具有可通过非相干检测恢复信息的优点，并且可以通过采用多个幅度调制来提高信息传输速率。不过，经过 PAM 调制的脉冲信号同样会出现线谱，这不仅给超宽带脉冲系统的信号满足频谱要求带来困难，还会降低功率利用率，在一定程度上限制了其应用范围。

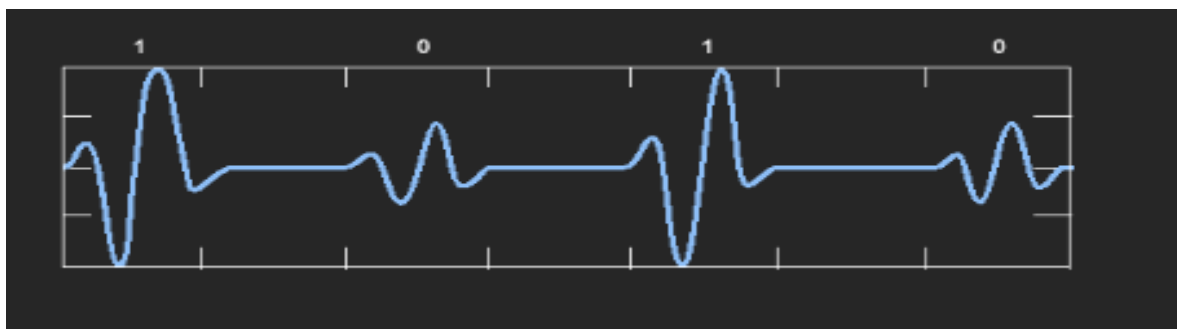


图 D3 脉幅调制示意图

通断键控调制（On-Off Keying, OOK）：OOK 调制是根据二进制数据来控制脉冲的有无，如下图 D4 所示。。在时域上，当传输“1”时，发送脉冲信号；当传输“0”时，不发送脉冲，表现为一段没有信号的间隔。频域上，OOK 信号的频谱通常包含一个主瓣和多个旁瓣，中心频率位于载波频率处，其带宽主要取决于脉冲的宽度和数据速率。

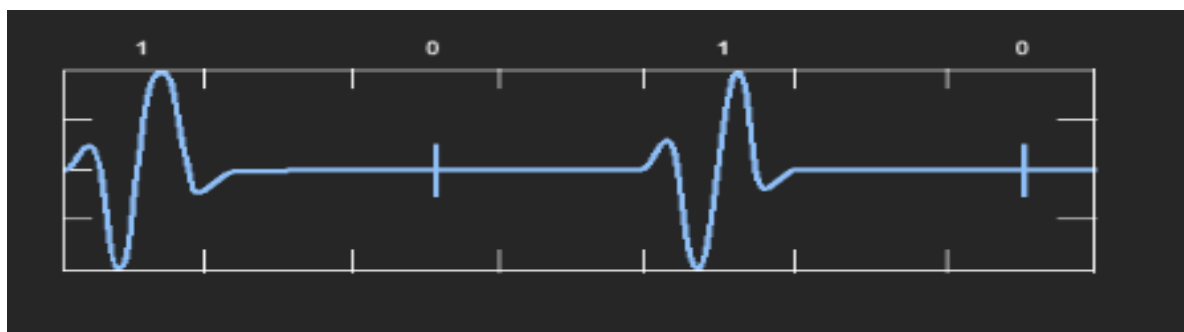


图 D4 OOK 调制示意图

如下图 D5 所示： $V_m(t)$ 是需要发送的数字信号， $A\cos(2\pi f_c t)$ 是未经过调制的载波， $V_{AM}(t)$ 是经过调制的载波信号。

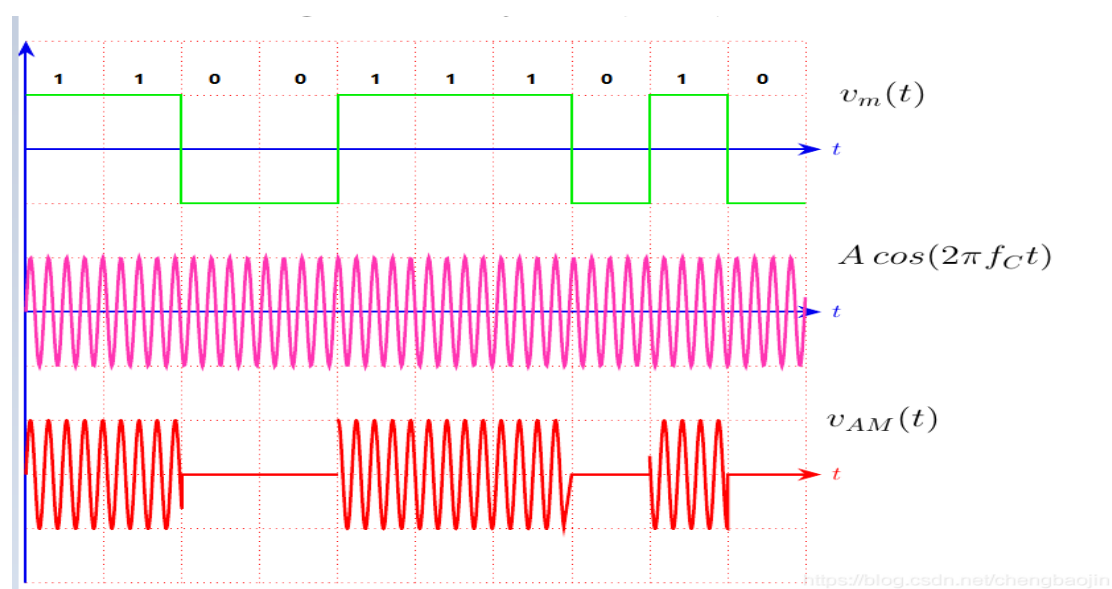


图 D5 函数合成示意图

### 3.1.3 二相调制 (BPSK-Binary Phase Shift Keying)

BPSK 通过改变脉冲的正负极性来调制二元信息,所有脉冲幅度的绝对值保持相同。在 BPSK 调制过程中,首先会产生一个载波信号,其可表示为数学上的正弦波函数  $A\cos(2\pi ft + \varphi)$ ,其中  $A$  是振幅, $f$  是频率, $t$  是时间, $\varphi$  是初始相位。在调制时,如果发送比特“1”,载波的相位会翻转 180 度,即  $\varphi$  变为  $\pi$ ;如果发送比特“0”,相位保持不变,即  $\varphi$  为 0。这种调制方式要求接收端能够准确地判断出每个比特的相位,以还原出原始的数字信号。由于 BPSK 只需要两种相位,它使得接收器的设计相对容易,而且不需要复杂的解调算法。在 UWB 系统中应用 BPSK 调制的一个重要原因是其在抗噪性能方面相较于 PPM 具有 3dB 的增益。这意味着在相同的噪声环境下,采用 BPSK 调制的 UWB 系统能够更可靠地传输数据,减少误码率。与 PAM 和 PPM 类似,BPSK 调制的信号也存在线谱问题,对系统的频谱特性和功率利用效率产生一定影响。但在一些对通信可靠性要求较高的 UWB 应用场景中,BPSK 调制的抗噪优势使其仍具有重要的应用价值。

## 3.2 复合调制

### 3.2.1 BPM - BPSK 调制

BPM - BPSK 调制是一种将突发位置调制 (BPM - Burst Position Modulation) 和二进制相移键控 (BPSK) 相结合的复合调制方式,在基于 IEEE 802.15.4 标准的 UWB 系统中得到广泛应用。在 BPM - BPSK 调制流程中,每个符号由一个突发脉冲组成,其中包含 2 比特信息。具体而言,一个比特用于选择突发脉冲在前半部分还是后半部分出现,以此实现 BPM 调制;另一个比特用于确定突发脉冲的相位,采用 BPSK 方式。在实际实施过程中,为避免符号间干扰,需要在两个 BPM 位置之间加入保护间隔 (Guard Interval)。同时,为降低多用户之间的干扰,将一个 BPM 位置划分成若干个可能位置 ( $N_{\text{hop}}$  个),不同用户随机选择这些时间上的突发,实现干扰随机化。例如,在每个 UWB PHY 符号间隔内,仅传输一个突发事件。由于突发持续时间 ( $T_{\text{burst}}$ ) 通常远短于 BPM 持续时间 ( $T_{\text{BPM}}$ ),即  $T_{\text{burst}} \ll T_{\text{BPM}}$ ,这在一定程度上提供了跳时形式的多用户接入干扰抑制。每个符号内的突发持续时间总数 ( $N_{\text{burst}}$ ) 由  $N_{\text{dsym}}/T_{\text{burst}}$  给出。为限制多径引起的符号间干扰量,每个  $T_{\text{BPM}}$  周期的前半部分才会包含突发。因此,每个 BPM 间隔内,只有前  $N_{\text{hop}} = N_{\text{burst}}/4$  个可能的突发位置是候选跳变突发位置,每个突发位置可根据跳时码在符号间变化。这种复合调制方式综合了 BPM 和 BPSK 的特点,既能够在一定程度上利用脉冲位置和相位来携带更多信息,提高频谱效率,又通过合理的设计降低了符号间干扰和多用户干扰,为 UWB 系统在复杂通信环境下的稳定运行提供了保障。

测试流程示例 (以 BPM-BPSK 为例):

#### 1) 校准阶段:

- a. 连接 DUT  $\rightarrow$  Tester,使用定向耦合器-40 dB 口做功率校准。
- b. Tester 发送标准 127 长度前导,DUT 完成 AFC 与定时恢复。

#### 2) 发射测试:

- a. DUT 在信道 5 (6489.6 MHz) 发射 850 kb/s 帧。
- b. Tester 捕获 1000 帧,自动计算:

中心频率误差  $\leq \pm 20$  ppm

PSD 掩模通过/失败

EVM、突发定时、相位误差。

#### 3) 接收测试:

- a. Tester 以 -85 dBm 功率发送  $10^6$  bits 已知序列。
- b. DUT 回传 BER / PER,判断接收灵敏度。

#### 4) 报告生成:一键输出符合 CTIA / FiRa 格式的 PDF 报告。

### 3.2.2 其他复合调制方式简介

除了 BPM-BPSK 调制外,UWB 超宽带测试仪还可能采用其他复合调制方式。例如,将脉位调制与脉幅调制相结合的 PPM - PAM 复合调制方式。在 PPM - PAM 调制流程中,先按照 PPM 的方式,利用伪随机码生成脉冲序列并通过信息比特控制脉冲位置实现跳时和脉位调制;然后在此基础上,根据



信息符号进一步控制脉冲幅度，实现脉幅调制。通过精心设计 PPM 和 PAM 的参数组合，能够在不同的应用场景下实现性能的优化。此外，还有将多进制调制与相位调制相结合的复合调制方式，如 MQAM - PSK (M - Quadrature Amplitude Modulation - Phase Shift Keying) 等。以 MQAM - PSK 为例，在调制时先对输入的二进制数据进行分组，每组数据对应一个特定的幅度和相位组合（即星座点）。通过这种方式，增加调制符号的状态数，在单位时间内传输更多的数据，适用于对数据传输速率要求较高的 UWB 应用场景。这些复合调制方式各有特点，通过巧妙地组合不同的基本调制方式，能够在频谱效率、抗干扰能力、传输可靠性等方面取得更好的平衡，以满足不同 UWB 应用对调制方式的多样化需求。

### 3.3 多带调制

#### 3.3.1 多带 OFDM (MB - OFDM - Multi - Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

MB-OFDM 是一种在 UWB 领域具有重要应用的多带调制技术。在 MB-OFDM 系统调制过程中，首先将整个 UWB 频段划分为多个子频段（子带）。对于每个子带，先将高速数据流分割成多个低速子数据流。接着产生多个相互正交的子载波，子载波的频率是基带信号频率的整数倍。然后利用数字信号处理（DSP）算法，将低速子数据流映射到这些子载波上，通过改变子载波的幅度和相位来携带数据信息，这一过程利用乘法器将基带信号和载波信号相乘，实现调制。之后，把各个子带调制后的信号进行叠加组合，形成最终的 MB-OFDM 信号。为了保证信号的质量，还需要通过低通滤波器去掉高频分量，得到适合于发射的调制信号。OFDM 技术通过将高速数据流分割成多个低速子数据流，并在多个相互正交的子载波上同时传输，有效抵抗多径衰落和提高频谱效率。MB-OFDM 技术在 UWB 中的应用具有诸多优势。首先，通过将信号分散到多个子带传输，可以降低每个子带的信号带宽，减少符号间干扰（ISI）的影响，从而提高系统在复杂多径环境下的传输性能。其次，MB-OFDM 可以灵活地根据信道条件调整各个子带的传输参数，如调制方式、编码速率等，实现自适应传输，进一步优化系统性能。此外，MB-OFDM 技术能够充分利用 UWB 的宽带特性，在保证通信质量的前提下，实现高速数据传输，适用于对数据速率要求较高的 UWB 应用，如无线高清视频传输、高速文件下载等场景。然而，MB-OFDM 技术也存在一些不足之处，例如其系统实现复杂度相对较高，对同步精度要求苛刻，并且由于子载波数量较多，峰均功率比（PAPR）较高，可能需要采用复杂的 PAPR 降低技术，增加了系统的成本和功耗。

#### 3.3.2 多带脉冲无线电 (MB - IR - Multi - Band Impulse Radio)

MB-IR 是另一种多带调制方式，它将 UWB 信号的频谱划分为多个子带，在每个子带上采用脉冲无线电（IR）技术进行信号传输。在 MB-IR 调制流程中，先对整个 UWB 信号频谱进行划分得到多个子带。对于每个子带，采用与单带 IR - UWB 类似的方式，先使用脉冲发生器生成超宽带脉冲，这些脉冲的波形通常是单个尖峰。然后根据要传输的信息，利用脉位调制（PPM）、脉幅调制（PAM）或者二相调制（BPSK）等方式对脉冲进行调制。例如采用 PPM 时，利用伪随机码生成脉冲序列，通过信息比特控制脉冲在每个子带内的位置；采用 PAM 时，根据信息符号控制脉冲幅度；采用 BPSK 时，依据信息比特改变脉冲的正负极性。与传统的单带 IR-UWB 相比，MB-IR 通过将脉冲信号分配到不同的子带，可以有效降低每个子带内的信号功率谱密度，更好地满足频谱规范要求。同时，多带传输方式能够在一定程度上提高系统的抗干扰能力，因为不同子带受到的干扰情况可能不同，通过合理的子带选择和信号处理，可以增强系统对复杂电磁环境的适应性。此外，MB-IR 还可以根据具体应用需求，灵活调整各个子带的脉冲重复频率（PRF）和脉冲幅度等参数，实现对不同传输场景的优化。然而，MB-IR 技术也面临一些挑战。由于需要在多个子带上进行信号的产生、传输和接收处理，系统的硬件复杂度和成本会相应增加。同时，子带间的同步和干扰协调问题也需要妥善解决，以确保整个系统的稳定运行和性能优化。在实际应用中，MB-IR 技术在一些对频谱管理和抗干扰性能要求较高的 UWB 应用场景中具有一定的优势，如军事通信、工业监测等领域。

## D.4 调制方式对 UWB 超宽带测试仪性能的影响

### 4.1 频谱特性

不同的调制方式会使 UWB 超宽带测试仪输出信号具有截然不同的频谱特性。例如，PPM、PAM 和 BPSK 等脉冲调制方式由于脉冲信号的特性，其频谱通常包含离散谱线和连续谱。离散谱线的存在可能导致信号在某些频率点上的能量过于集中，难以满足严格的频谱规范要求，如在一些对电磁兼容性（EMC）要求较高的应用场景中，这些离散谱线可能会对其他电子设备产生干扰。而 MB-OFDM 等多带调制方式，通过将信号分散到多个子带进行传输，其频谱相对较为平坦，能够更好地适应不同的频谱分配方案，在满足频谱规范的前提下，充分利用 UWB 的宽带特性，提高频谱利用率。此外，复合调制方式如 BPM-BPSK，通过合理设计脉冲位置和相位的调制规则，在一定程度上优化了频谱分布，减少了频谱泄漏和干扰，使信号的频谱特性更加符合 UWB 系统的实际应用需求。对于 UWB 超宽带测试仪而言，准确控制和调整信号的频谱特性是确保其测量准确性和可靠性的关键因素之一，不同调制方式在频谱特性方面的差异，直接影响了测试仪在不同应用场景下的适用性。

### 4.2 抗干扰能力

调制方式对 UWB 超宽带测试仪的抗干扰能力有着重要影响。在复杂的电磁环境中，各种干扰信号可能会对 UWB 信号的传输和测量产生严重影响。BPSK 调制由于其在抗噪性能方面相较于 PPM 具有 3dB 的增益，使得采用 BPSK 调制的 UWB 测试仪在面对高斯白噪声等常见干扰时，能够更有效地抑制噪声干扰，保证信号的正确传输和测量。而在多用户干扰场景下，BPM-BPSK 调制通过在 BPM 位置中引入随机化机制，不同用户随机选择时间上的突发，降低了多用户之间的干扰，提高了测试仪在多用户环境下的抗干扰能力。MB-OFDM 技术则通过将信号分散到多个子带传输，并且利用 OFDM 技术的正交性，能够在一定程度上抵抗频率选择性衰落和多径干扰，即使部分子带受到干扰，仍可通过其他子带传输信息，保证系统的整体性能。相比之下，PPM 和 PAM 调制方式由于其信号特性，在抗干扰能力方面相对较弱，容易受到外界干扰信号的影响，导致测量误差增大。因此，在选择 UWB 超宽带测试仪的调制方式时，需要充分考虑实际应用环境中的干扰情况，选择具有较强抗干扰能力的调制方式，以确保测试仪能够在复杂电磁环境下准确、稳定地工作。

### 4.3 传输速率与精度

调制方式与 UWB 超宽带测试仪的传输速率和测量精度密切相关。一般来说，采用多进制调制或复合调制方式能够在单位时间内传输更多的信息，从而提高传输速率。例如，MQAM-PSK 等复合调制方式通过增加调制符号的状态数，每个符号可以携带更多比特的数据，相比传统的二进制调制方式，能够显著提升数据传输速率。在测量精度方面，调制方式的选择也起着关键作用。PPM 调制由于其对脉冲位置的精确控制，在一些对时间分辨率要求较高的定位和测距应用中，能够实现较高的测量精度。然而，PPM 信号中的离散谱线可能会影响信号的稳定性，对测量精度产生一定的负面影响。而 MB-OFDM 技术通过精确的子载波同步和信号处理算法，在保证高速数据传输的同时，也能够实现较高的测量精度，适用于对传输速率和测量精度都有严格要求的 UWB 应用场景，如高精度室内定位系统的测试和校准。此外，BPM-BPSK 调制方式通过合理利用脉冲位置和相位携带信息，在一定程度上兼顾了传输速率和测量精度的要求，为 UWB 超宽带测试仪在不同应用中的性能优化提供了有效的手段。

## D.5 UWB 技术的实现

UWB 物理层波形是基于有限带宽的脉冲信号。基本的脉冲信号是巴特沃斯形式。

在时域中，一维巴特沃斯脉冲的表达式通常可以表示为：

$$p(t) = \frac{t^n}{(t^2 + \tau^2)^{\frac{n+1}{2}}} \quad (\text{D1})$$

式 D1 中： $p(t)$  ----巴特沃斯脉冲信号，它是关于时间  $t$  的函数；

$n$  ----巴特沃斯阶数，正整数，决定了脉冲的形状和频谱特性。阶数  $n$  越高，脉冲的频谱滚降越陡峭，脉冲形状越接近理想的高斯脉冲形状，但同时计算复杂度也会增加；

$\tau$  ----时间常数，用于控制脉冲的时间尺度，决定了脉冲在时间域上的展宽程度。

脉冲信号  $p(t)$  的基带脉冲响应(BIR Baseband impulse response)需要符合 UWB 国际标准，如下表 D1 所示。发射的脉冲  $p(t)$  应具有使得互相关函数的大小  $|\phi(\tau)|$  主瓣大于等于 0.8，持续时间至少为  $T_w$ ，如下表不同通道对应的脉冲主瓣宽度(Main Lobe Width:  $T_w$ )定义，并且任何旁瓣应不大于 0.3。

表 D1 基带脉冲响应的 UWB 国际标准要求

信道号	脉冲持续时间 $T_p(\text{ns})$	脉冲主瓣宽度 $T_w(\text{ns})$
0:3, 5:6, 8:10, 12:14	2.00	0.5
7	0.92	0.2
4, 11	0.75	0.2
15	0.74	0.2

发射脉冲形状需要满足如下互相关函数形状的约束，具体函数如下：

$$\phi(\tau) = \frac{1}{\sqrt{E_r E_p}} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} r(t) p^*(t + \tau) dt \quad (\text{D2})$$

式(D2)中：  $p^*$  ----发射脉冲  $p(t)$  的复共轭；

$E_r$  ----参考脉冲的能量；

$E_p$  ----发射信号脉冲的能量；

$\operatorname{Re}$  ----取相关后的实数部。

$r(t)$  ----用于计算  $|\phi(\tau)|$  是滚降因子为  $\beta = 0.5$  的余弦脉冲。

从数学上讲定义如下：

$$r(t) = \frac{4\beta}{\pi\sqrt{T_p}} \frac{\cos[(1+\beta)\pi t/T_p] + \frac{\sin[(1-\beta)\pi t/T_p]}{4\beta(t/T_p)}}{1 - (4\beta t/T_p)^2} \quad (\text{D3})$$

式(D3)中：  $r(t)$  ----用于计算  $|\phi(\tau)|$  是滚降因子为  $\beta = 0.5$  的余弦脉冲；

$T_p$  ----脉冲持续时间。

下图给出了一个 UWB 兼容的脉冲  $p(t)$ ，图下图 D6 所示，中间是一个 RRC 根升余弦参考脉冲  $r(t)$ ， $T_p=2.0\text{ns}$ ，右图是相关函数  $|\phi(\tau)|$  的幅度。 $p(t)$  是一个 8 阶巴特沃斯脉冲，它的 3dB 带宽是 500MHz。主瓣描述的是  $|\phi(\tau)|$  的规格。主瓣归一化高度要大于 0.8，最大旁瓣高度要低于 0.3。

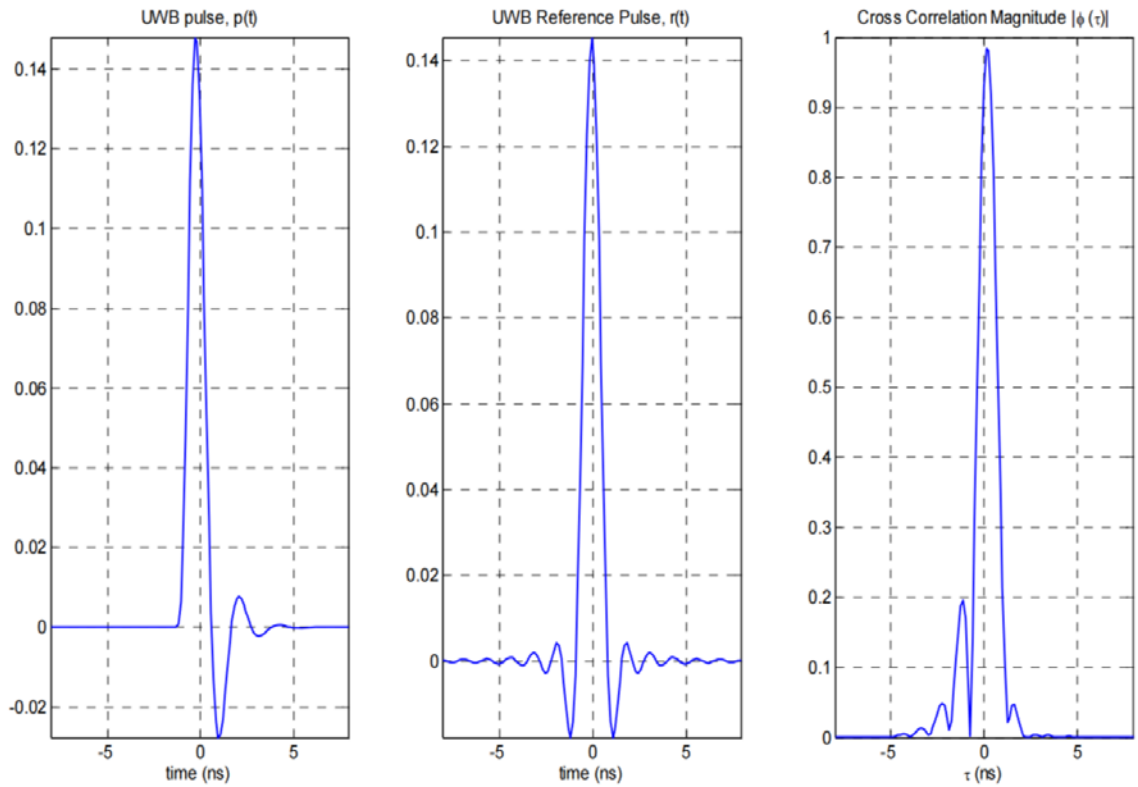


图 D6 UWB 脉冲示意图

## D.6 总结

UWB 超宽带测试仪的调制方式多种多样，每种调制方式都有其独特的特点和适用场景。脉冲调制中的 PPM、PAM 和 BPSK，各自在实现复杂度、频谱特性和抗干扰能力等方面表现出不同的性能；复合调制方式如 BPM-BPSK，通过巧妙组合基本调制方式，在提高频谱效率和抗干扰能力方面具有优势；多带调制的 MB-OFDM 和 MB-IR，则分别在频谱利用和抗多径干扰等方面展现出独特的性能。这些调制方式对 UWB 超宽带测试仪的频谱特性、抗干扰能力以及传输速率与精度等性能指标产生了显著影响。在实际应用中，需要根据具体的测试需求和应用场景，综合考虑各种调制方式的优缺点，选择最合适的调制方式，以确保 UWB 超宽带测试仪能够发挥出最佳性能，为 UWB 技术的发展和應用提供可靠的测试支持。随着 UWB 技术在更多领域的深入应用和不断发展，对 UWB 超宽带测试仪调制方式的研究和创新也将持续进行，以满足日益增长的高精度、高可靠性测试需求。