

中华人民共和国工业和信息化部 通信计量技术规范

JJF（通信）XXXX-XXXX

星闪无线综合测试仪校准规范

Calibration Specification for SparkLink Wireless Testers

（报批稿）

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

星闪无线综合测试仪校准规范

Calibration Specification for SparkLink
Wireless Testers

JJF (通信) XXXX-XXXX

归口单位：中国信息通信研究院

主要起草单位：中国信息通信研究院

为准(北京)电子科技有限公司

参加起草单位：中国信息通信研究院

上海市计量测试技术研究院有限公司

国家无线电监测中心检测中心

本规程技术条文委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

张培艳（中国信息通信研究院）

李耀华（为准(北京)电子科技有限公司）

张向阳（中国信息通信研究院）

参加起草人：

张顺成（中国信息通信研究院）

孙景禄（中国信息通信研究院）

蔡 青（上海市计量测试技术研究院有限公司）

刘天宇（国家无线电监测中心检测中心）

目 录

引言.....	(II)
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 概述.....	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.....	4
6.1 校准项目.....	4
6.2 外观及工作正常性检查.....	4
6.3 10MHz 参考频率输出.....	4
6.4 射频输出频率.....	5
6.5 射频输出功率.....	5
6.6 谐波.....	5
6.7 单边带相位噪声.....	6
6.8 数字调制参数.....	6
6.9 频率测量.....	7
6.10 射频功率测量.....	7
6.11 数字解调参数.....	7
6.12 射频输入端口电压驻波比.....	8
7 校准结果表达.....	8
8 复校时间间隔.....	9
附录 A 原始记录内页推荐格式.....	10
附录 B 校准证书内页推荐格式.....	13
附录 C 星闪无线综合测试仪校准不确定度评定示例.....	16
附录 D 星闪技术概述.....	24

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 1001-2011《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。

本规范为首次发布。

星闪无线综合测试仪校准规范

1 范围

本规范适用于星闪无线综合测试仪（简称星闪综测仪）的校准。

2 引用文件

T/XS 10002-2025 星闪无线通信系统 接入层 同步低功耗空口 SLE 技术要求和测试方法

T/XS 10001-2025 星闪无线通信系统 接入层 同步低时延宽带空口 SLB 技术要求和测试方法

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 概述

星闪综测仪是测量星闪终端的发射信号和接收信号性能参数的设备，一般包括内部晶体振荡器、信号发生模块、信号分析模块等功能模块，主要用于星闪终端生产、研发和测试过程中功率、频谱、调制等参数的测试。星闪设备主要应用在智能汽车、工业智造、智慧家庭、个人穿戴典型应用场景中。

4 计量特性

4.1 10MHz 参考频率输出

范围：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~10 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 ~ +5 dBm；

最大允许误差： $\pm (0.5 \sim 1.5)$ dB。

4.2.3 谐波：

二次谐波： ≤ -25 dBc；

三次谐波： ≤ -25 dBc；

二分之一次谐波： ≤ -40 dBc。

4.2.4 单边带相位噪声： ≤ -100 dBc/Hz(偏置频率 100 kHz)。

4.2.5 数字调制参数

4.2.5.1 调制频偏

范围	符号速率
18.5 kHz~27.5 kHz	0.1 Msym/s
23.125 kHz~34.375 kHz	0.125 Msym/s
46.25 kHz~68.75 kHz	0.25 Msym/s
92.5 kHz~137.5 kHz	0.5 Msym/s
185 kHz~275 kHz	1 Msym/s)
370 kHz~550 kHz	2 Msym/s
740 kHz~1100 kHz	4 Msym/s

最大允许误差：±1 %。

4.2.5.2 误差矢量幅度

范围：0.2 %~20 %；

最大允许误差：≤1.5 %。

4.3 信号分析模块

4.3.1 频率测量

范围：100 MHz~10 GHz；

最大允许误差：±1.0×10⁻⁸。

4.3.2 射频功率测量

范围：(-70 ~ +30) dBm；

最大允许误差：±(0.5~1.5) dB。

4.3.3 数字解调参数

4.3.3.1 调制频偏测量

范围	符号速率
18.5 kHz~27.5 kHz	0.1 Msym/s
23.125 kHz~34.375 kHz	0.125 Msym/s
46.25 kHz~68.75 kHz	0.25 Msym/s
92.5 kHz~137.5 kHz	0.5 Msym/s
185 kHz~275 kHz	1 Msym/s)
370 kHz~550 kHz	2 Msym/s
740 kHz~1100 kHz	4 Msym/s

最大允许误差：±1 %。

4.3.3.2 误差矢量幅度测量

范围：0.2 %~20 %；

最大允许误差：≤1.5 %。

4.3.4 射频输入端口电压驻波比:

电压驻波比: ≤ 1.5 ;

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: $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$;

相对湿度: 20 % ~ 80 %;

电源要求: $(220 \pm 11) \text{ V}$ 、 $(50 \pm 1) \text{ Hz}$;

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 ~ 10 GHz;

最大允许误差: $\pm 1.0 \times 10^{-9}$ 。

5.2.2 功率计

频率范围: 100 MHz ~ 10 GHz;

功率测量范围: $(-70 \sim +30) \text{ dBm}$;

功率校准因子不确定度: 3 % ($k=2$)。

5.2.3 矢量信号发生器(带星闪制式调制功能)

频率范围: 100 MHz ~ 10 GHz;

输出功率范围: $(-110 \sim +30) \text{ dBm}$;

输出功率不确定度: 0.5 dB ($k=2$);

调制频偏最大允许误差: $\pm 1 \%$;

误差矢量幅度不确定度: 1.2% ($k=2$);

注: 有外接频标功能, 频率测量最大允许误差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: 50 MHz ~ 30 GHz;

功率测量范围: $(-130 \sim +20) \text{ dBm}$;

功率线性度: $\pm 0.02 \text{ dB/10dB}$;

单边带相位噪声: $\leq -126 \text{ dBc/Hz}$ (偏置频率 100 kHz)。

5.2.5 矢量信号分析仪(带星闪制式解调功能)

频率范围: 100 MHz ~ 10 GHz;

调制频偏测量最大允许误差: $\pm 1 \%$;

误差矢量幅度测量不确定度：1.2%($k=2$)；

5.2.6 网络分析仪

频率范围：100 MHz~10 GHz；

电压驻波比不确定度：0.02 ~ 0.03 ($k=2$)。

5.2.7 功分器

频率范围：100 MHz~10 GHz；

幅度平衡度不确定度：0.20 dB($k=2$)。

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	模块
1	10MHz 参考频率输出	内部晶体振荡器
2	射频输出频率	信号发生模块
3	射频输出功率	
4	谐波	
5	单边带相位噪声	
6	数字调制参数	
7	频率测量	信号分析模块
8	射频功率测量	
9	数字解调参数	
10	射频输入端口电压驻波比	

6.2 外观及工作正常性检查

6.2.1 被校星闪无线综合测试仪的外观应完好，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 被校星闪无线综合测试仪应有说明书及配套附件。

6.2.3 被校星闪无线综合测试仪按技术说明书规定时间预热，预热后应显示正常。

6.2.4 如被校星闪无线综合测试仪具有自校准功能，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 10MHz 参考频率输出

6.3.1 仪表连接如图 1 所示。

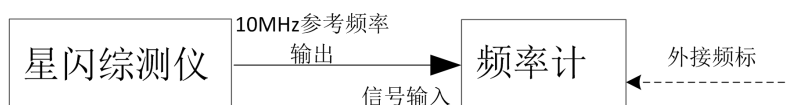


图 1 10MHz 参考频率输出校准连接示意图

6.3.2 将星闪无线综合测试仪 10MHz 参考频率输出端接到频率计的输入端，由频率计读出

10MHz 参考频率输出的实际值。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。

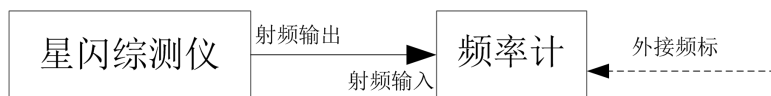


图 2 射频输出频率校准连接示意图

6.4.2 设置星闪无线综合测试仪为发射连续波(CW)模式，设置输出功率为适当值(一般为 -10dBm)，从最低到最高改变载波频率，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 设置星闪无线综合测试仪为发射连续波(CW)模式，按频率范围选择输出频率。

6.5.3 按仪表说明书要求，从最低到最高设置被校星闪无线综合测试仪的输出功率，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。

6.5.4 改变频率，重复 6.5.3。

6.6 谐波

6.6.1 仪表连接如图 4 所示。

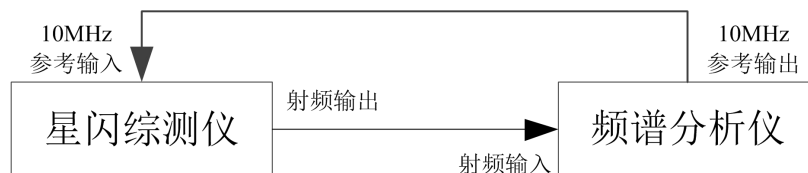


图 4 谐波校准连接示意图

6.6.2 设置星闪无线综合测试仪为发射连续波(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 0 dBm)。

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 从最低到最高改变星闪无线综合测试仪的输出频率，重复步骤 6.6.3，将测量结果记录在附录 A 表 A.5 中。

6.7 单边带相位噪声

6.7.1 仪表连接如图 4 所示。

6.7.2 星闪无线综合测试仪选择发射连续波(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 设置频谱分析仪中心频率为星闪无线综合测试仪的输出频率 f ，按要求设置分辨力带宽 f_{BW} 及扫频宽度，若星闪无线综合测试仪说明书中频率偏移为 Δf (建议为 100 kHz)，则频谱分析仪的扫频宽度为 $2.5 \times \Delta f$ 。

6.7.4 分别测量载波频率 f 的功率 P 和偏离载波 Δf 处的最大相位噪声功率 P_{Δ} ，并记录在附录 A 表 A.6 中。

6.7.5 使用公式(1)计算单边带相位噪声，并记录在附录 A 表 A.7 中

$$L = P_{\Delta} - P - 10 \times \lg f_{BW} + C \quad (1)$$

式中： L ——单边带相位噪声，dBc/Hz；

P ——载波功率，dBm；

P_{Δ} ——边带功率，dBm；

f_{BW} ——频谱分析仪分辨力带宽，Hz；

C ——频谱分析仪测量随机噪声的修正值，dB。

6.7.6 改变频率偏移 Δf ，重复步骤 6.7.4~6.7.5。

6.7.7 改变星闪无线综合测试仪的载波频率，重复步骤 6.7.3~6.7.6，将结果记录在附录 A 表 6.6 中。

注：如频谱分析仪自带单边带相位噪声选件，可以直接测量。

6.8 数字调制参数

6.8.1 仪表连接如图 5 所示。

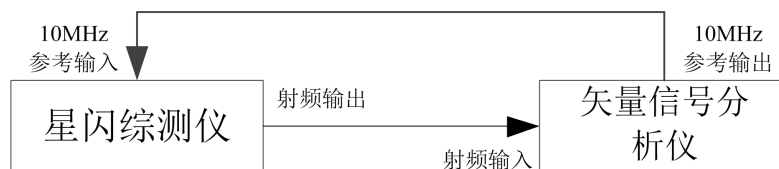


图 5 数字调制参数校准连接示意图

6.8.2 星闪无线综合测试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。

6.8.3 矢量信号分析仪选择星闪解调模式，将中心频率设为星闪无线综合测试仪的输出频率，参考功率量程设置为自动(或在输入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), 在测量结果中读取数字调制参数, 具体包括调制频偏、误差矢量幅度等参数, 并记录于附录 A 表 A.7 中。

6.8.4 改变星闪无线综合测试仪的载波频率, 重复步骤 6.8.3, 并将结果记录于附录 A 表 A.7 中。

6.9 频率测量

6.9.1 仪表连接如图 6 所示。



图 6 频率测量校准连接示意图

6.9.2 将矢量信号发生器输出端口通过射频电缆与星闪无线综合测试仪直接连接。

6.9.3 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 。

6.9.4 星闪无线综合测试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 , 在星闪无线综合测试仪上读出频率指示值, 并记录于附录 A 表 A.8 中。

6.9.5 改变矢量信号发生器的输出频率, 重复步骤 6.9.4, 并记录于附录 A 表 A.8 中。

6.10 射频功率测量

6.10.1 仪表连接如图 7 所示。

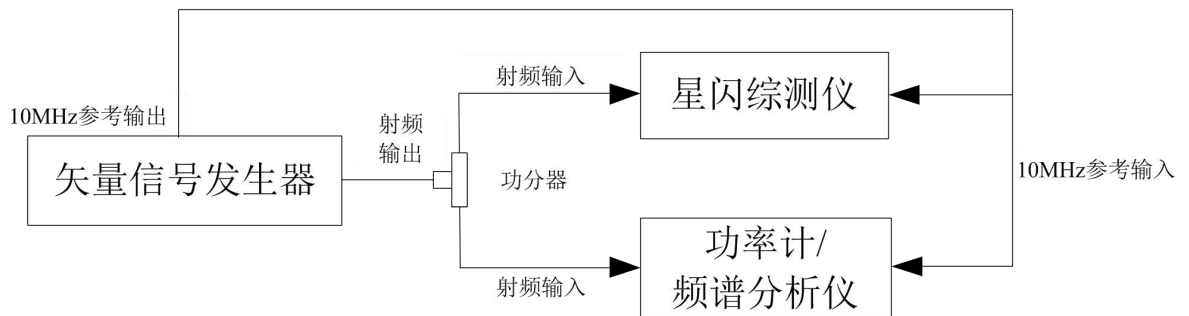


图 7 射频功率测量校准连接示意图

6.10.2 矢量信号发生器输出连续波信号, 设置合适的输出频率。

6.10.3 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 作为标准值, 记录于附录 A 表 A.9 中。

6.10.4 星闪无线综合测试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 , 在星闪无线综合测试仪上读出功率指示值 P , 并记录于附录 A 表 A.9 中。

6.10.5 改变矢量信号发生器输出功率和频率, 重复步骤 6.10.3~6.10.4, 并将测量结果记录于附录 A 表 A.9 中。

6.11 数字解调参数

6.11.1 仪表连接如图 8 所示。

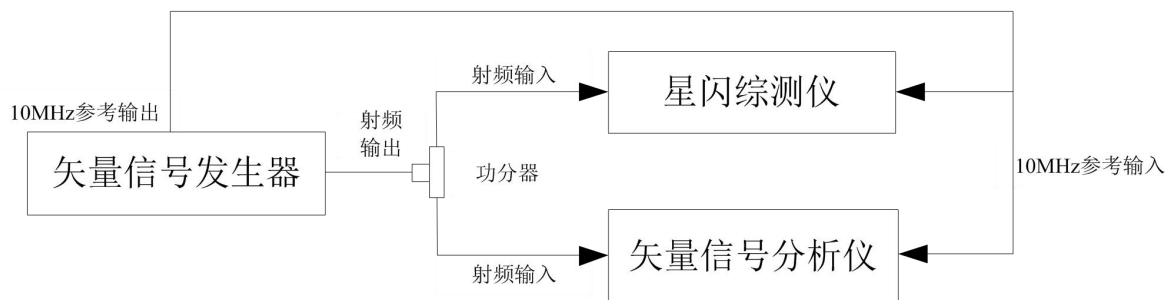


图 8 数字解调参数测量校准连接示意图

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

6.11.3 矢量信号分析仪和星闪无线综合测试仪选择星闪解调模式，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星闪无线综合测试仪的测量结果中读出调制频偏、误差矢量幅度等参数，并记录于附录 A 表 A.10 中。

6.11.4 按仪表说明书要求，改变矢量信号发生器输出频率，重复步骤 6.11.3，并记录于附录 A 表 A.10 中。

6.12 射频输入端口电压驻波比

6.12.1 仪表连接如图 9 所示。



图 9 射频输入端口电压驻波比校准连接示意图

6.12.2 网络分析仪起始频率和终止频率设为被校星闪无线综合测试仪射频端口的频率范围，网络分析仪进行单端口校准。

6.12.3 连接星闪无线综合测试仪到网络分析仪的校准面/测试面，选取被测频率，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.11 中。

7 校准结果表达

星闪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。建议不超过 1 年。更换重要部件、维修或对仪器性能有怀疑时, 应及时校准。

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 10MHz 参考频率输出

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($k=2$)

表 A.5 谐波

测试项目	载波频率(MHz)	输出功率(dBm)	实测值(dBc)	不确定度($k=2$)
二次谐波				
三次谐波				
二分之一次谐波				

表 A.6 单边带相位噪声

 $f_{BW} =$ Hz, $C =$ dB

载波频率 (MHz)	频偏 Δf (kHz)	P 实测值 (dBm)	P_{Δ} 实测值 (dBm)	L 实测值 (dBc/Hz)	不确定度 ($k=2$)

表 A.7 数字调制参数

a) TYPE1 :GFSK 数字调制质量参数

载波频率 (MHz)	码型	参数	实测值	不确定度 ($k=2$)
	00001111	调制频偏 Δf_1 (kHz)		
	01010101	调制频偏 Δf_2 (kHz)		

b) TYPE2 :PSK 数字调制质量参数

载波频率 (MHz)	参数	实测值	不确定度 ($k=2$)
	EVM(%)		

表 A.8 频率测量

标准值(MHz)	指示值(MHz)	不确定度($k=2$)

表 A.9 射频功率测量

频率(MHz)	标准值(dBm)	指示值(dBm)	不确定度($k=2$)

表 A. 10 数字解调参数

a) TYPE1 :GFSK 数字解调质量参数

载波频率 (MHz)	码型	参数	标准值	实测值	不确定度 ($k=2$)
	00001111	调制频偏 Δf_1 (kHz)			
	01010101	调制频偏 Δf_2 (kHz)			

b) TYPE2 :PSK 数字解调质量参数

载波频率 (MHz)	参数	标准值	实测值	不确定度 ($k=2$)
	EVM(%)			

表 A. 11 射频输入端口电压驻波比

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 10MHz 参考频率输出

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($k=2$)

表 B.4 谐波

测试项目	载波频率(MHz)	输出功率(dBm)	实测值(dBc)	不确定度($k=2$)
二次谐波				
三次谐波				
二分之一次谐波				

表 B.5 单边带相位噪声

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

表 B.6 数字调制参数

a) TYPE1:GFSK 数字调制质量参数

载波频率 (MHz)	码型	参数	实测值	不确定度 ($k=2$)
	00001111	调制频偏 Δf_1 (kHz)		
	01010101	调制频偏 Δf_2 (kHz)		

b) TYPE2:PSK 数字调制质量参数

载波频率 (MHz)	参数	实测值	不确定度 ($k=2$)
	EVM(%)		

表 B.7 频率测量

标准值(MHz)	指示值(MHz)	不确定度($k=2$)

表 B.8 射频功率测量

频率(MHz)	标准值(dBm)	指示值(dBm)	不确定度($k=2$)

表 B.9 数字解调参数

a) TYPE1 :GFSK 数字解调质量参数

载波频率 (MHz)	码型	参数	标准值	实测值	不确定度 ($k=2$)
	00001111	调制频偏 Δf_1 (kHz)			
	01010101	调制频偏 Δf_2 (kHz)			

b) TYPE2 :PSK 数字解调质量参数

载波频率 (MHz)	参数	标准值	实测值	不确定度 ($k=2$)
	EVM(%)			

表 B.10 射频输入端口电压驻波比

频率(MHz)	测试端口	实测值	不确定度($k=2$)

附录 C

星闪无线综合测试仪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星闪无线综合测试仪的输出频率。以使用外控参考频标的频率计测试星闪无线综合测试仪输出的 2402MHz 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_{1r} ;
- (2) 频率计测量重复性引入的不确定度 u_{2r} ;
- (3) 频率计分辨力引入的不确定度 u_{3r} 。

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_{1r} ;

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 $\pm 1 \times 10^{-9}$ ，即 $a_1 = 1 \times 10^{-9}$ ，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 $u_{1r} = a_1 / k_1 = 5.8 \times 10^{-10}$ 。

- (2) 频率计测量重复性引入的不确定度 u_{2r} ;

在被校星闪无线综合测试仪射频信号发生器输出频率 2402MHz，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 C.1 所示：

表 C.1 射频输出频率测量结果

测量次数	实测值(MHz)
1	2402.000003
2	2402.000003
3	2402.000002
4	2402.000003
5	2402.000002
6	2402.000003
7	2402.000003
8	2402.000003
9	2402.000002
10	2402.000002

则单次测量结果的试验标准差 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} / \bar{X} \approx 2.0 \times 10^{-10}$

标准不确定度使用试验标准差表示，则 $u_{2r} = s = 2.0 \times 10^{-10}$ 。

(3) 频率计分辨力引入的不确定度 u_{3r} 。

由实际频率计指标说明书得到, 当测量频率为 2402 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 $a_3=4.16\times 10^{-10}$, 测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布 $k_3=\sqrt{3}$

$$\text{标准不确定度 } u_{3r} = a_3 / (2 \times k_3) = 1.2 \times 10^{-10}$$

C.1.4 不确定度合成

(1) 不确定度分量汇总表如下表 C.2 所示:

表 C.2 射频输出频率不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量				
	不确定度来源	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	1×10^{-9}	均匀分布	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-10}
2	频率计读数重复性	/	/	/	2.0×10^{-10}
3	频率计分辨力	1.5×10^{-10}	均匀分布	$\sqrt{3}$	1.2×10^{-10}

(2) 合成标准不确定度

以上不确定度分量彼此不相关, 则

$$u_{cr} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 u_i^2} \approx 6.2 \times 10^{-10}$$

(3) 扩展不确定度

扩展因子 $k=2$, 扩展不确定度 $U_r = k \times u_{cr} \approx 1.2 \times 10^{-9}$ 。

C.2 射频输出功率不确定度评定

C.2.1 测量方法

星闪无线综合测试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星闪无线综合测试仪输出的 2402 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_{1r} ;

标准功率计在功率参考点上(0 dBm)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： $u_{1r}=U_{p11}/k_1=0.4\%$ 。

(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} ;

在被校星闪无线综合测试仪输出频率 2402MHz，功率为 0.1mW 处，使用功率计对星闪无线综合测试仪重复测量 10 次，测量结果如下表 C.3 所示：

表 C.3 星闪无线综合测试仪在输出功率 0.1mW 时，使用功率计测量结果

测量次数	实测值(mW)
1	0.0975
2	0.0977
3	0.0976
4	0.0970
5	0.0975
6	0.0982
7	0.0979
8	0.0978
9	0.0974
10	0.0973

$$\text{则单次测量结果的实验标准差 } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.00032\text{mW}$$

标准不确定度使用实验标准差表示，则 $u_2=s=0.00032\text{mW}$ ，换算成相对值为： $u_{2r}=0.00042/0.1=0.32\%$ 。

(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} ;

根据仪表的指标说明书得到，功率计输入端口电压驻波比 <1.1 ，即 $|\Gamma_s|=0.0476$ ；被测星闪无线综合测试仪输入输出端口电压驻波比 ≤ 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 $u_{3r}=a_3/k_3\approx 0.013=1.3\%$ 。

(4) 功率计的功率测量线性度引入的不确定度 u_{4r} ;

根据功率计的指标说明书，测量线性度最大允许误差 $a_4=\pm 0.03\text{dB}$ ，换算成相对误差即 $a_4=0.03/4.34\approx 0.0069=0.69\%$ ，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 $u_{4r}=a_4/k_4=0.69\%/\sqrt{3}\approx 0.40\%$ 。

(5) 功率计分辨力引入的不确定度 u_{5r} ;

功率计分辨力为 0.01dB，其一半为 0.005dB，即 $a_5=0.005\text{dB}$ ，换算成相对值 $a_5=0.12\%$ ，按均匀分布 $k_5=\sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u_{5r}=a_5/k_5\approx 0.07\%$ 。

C.2.4 不确定度合成

(1) 不确定度分量汇总表如下表 C.4 所示：

表 C.4 星闪无线综合测试仪输出功率在 0.1mW 处，不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量				
	不确定度来源	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	1.1%	/	2	0.40%
2	功率计校准过程中的连接及读数重复性	/	/	/	0.32%
3	功率计校准过程中系统失配	1.9%	反正弦	$\sqrt{2}$	1.3%
4	功率计的功率测量线性度	0.69%	均匀	$\sqrt{3}$	0.40%
5	功率计分辨率引入的不确定度	0.12%	均匀	$\sqrt{3}$	0.07%

(2) 合成标准不确定度

以上不确定度分量彼此不相关，则

$$u_r = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u_{ir}^2} = 1.5\%$$

即 $u = 1.5\% \times 4.34 \approx 0.065\text{dB}$

(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 单边带相位噪声校准不确定度评定

C.3.1 测量方法

星闪无线综合测试仪单边带相位噪声校准是使用频谱分析仪直接测量。以使用频谱分析仪对被校星闪无线综合测试仪输出的 2402MHz，-10dBm 信号测试为例，进行不确定度评定。

C.3.2 不确定度来源

经分析，不确定度来源有以下 3 项：

- (1) 频谱分析仪相位噪声本底对被测相位噪声引入的不确定度 u_1 ；
- (2) 频谱分析仪电平测量的线性引入的不确定度 u_2 ；
- (4) 频谱分析仪在校准过程中的连接及读数重复性引入的不确定度 u_3 ；

C.3.3 标准不确定度评定

- (1) 频谱分析仪相位噪声本底对被测相位噪声引入的不确定度 u_1 ；

根据实测数据，频谱分析仪在 2402MHz(频偏 100kHz)相位噪声本底是-139dBc/Hz，被测星闪综测仪在 2402MHz(频偏 100kHz)相位噪声是-123dBc/Hz， $\text{SNR} = -123 - (-139) = 16\text{dB}$ 。

根据下列公式计算得出

$$u = \frac{20}{\sqrt{n}} \times \log(1 - 10^{-\frac{SNR}{20}}) \approx 0.67$$

其中 $n=5$ ，为平均次数。

标准不确定度分量 $u_1=0.67\text{dB}$

(2) 频谱分析仪电平测量的线性引入的不确定度分量 u_2 ;

由频谱分析仪的指标说明书得到，频谱分析仪测量线性度最大允许误差为 $\pm 0.12\text{dB}$ ，即 $a_2=0.12\text{dB}$ ，测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布 $k_2=\sqrt{3}$

标准不确定度分量 $u_2=a_2/k_2\approx 0.0693\text{dB}$

(3) 频谱分析仪在校准过程中的连接及读数重复性引入的不确定度分量 u_3 ;

在被校星闪综测仪输出频率 2402MHz ，功率为 -10dBm 处，使用频谱分析仪对星闪综测仪重复测量 10 次，测量结果如下表 C.5 所示：

表 C.5 单边带相位噪声测试结果

测量序号	实测值(dBc/Hz)
1	-123.1
2	-124.5
3	-124.2
4	-123.9
5	-123.5
6	-124.8
7	-124.2
8	-123.6
9	-123.0
10	-123.4

则单次测量结果的实验标准差 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.6\text{dB}$ ，即 $u_4=0.6\text{dB}$

C.3.4 不确定度合成

(1) 不确定度分量汇总表如下表 C.6 所示：

表 C.6 星闪无线综合测试仪输出功率在 0.1mW 处，单边带相位噪声不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量				
	不确定度来源	测量误差或准确度	分布类型	包含因子	标准不确定度
1	频谱分析仪电平测量的频率响应	1.5dB	均匀	$\sqrt{3}$	0.67dB
2	频谱分析仪电平测量的线性	0.12dB	均匀	$\sqrt{3}$	0.0693dB
3	线缆插入损耗的频率响应	0.5dB	均匀	$\sqrt{3}$	0.289 dB
4	连接及读数重复性	/	/	/	0.6dB

（2）合成标准不确定度

以上不确定度分量彼此不相关，则

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^4 u_i^2} \approx 0.95\text{dB}$$

（3）扩展不确定度

扩展因子 $k=2$ ，扩展不确定度 U 为： $U=k \times u=2 \times 0.95=1.9\text{dB}$

C.4 误差矢量幅度校准不确定度评定

C.4.1 测量方法

星闪无线综合测试仪误差矢量幅度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星闪无线综合测试仪输出的中心频率 2402 MHz，功率-10 dBm 的星闪调制信号为例，进行不确定度评定。

C.4.2 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.4.3 不确定度评定

- （1）矢量信号分析仪测量不确定度引入的标准不确定度分量 u_1 ；

矢量信号分析仪的测量不确定度 $a_1=1.2\%$ ， $k_1=2$

则标准不确定度 $u_1=a_1/k_1=0.60\%$ 。

- （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 $k_2=\sqrt{3}$ ，标准不确定度分量为 $u_2=0.01\%/(2 \times k_2)=0.0029\%$ 。

- （3）校准过程中测量重复性引入的不确定度 u_3 。

星闪无线综合测试仪输出星闪调制信号，频率 2402 MHz，功率-10 dBm 处，使用矢量

信号分析仪对星闪无线综合测试仪重复测量 10 次，测量结果如下表 C.7 所示：

表 C.7 星闪制式误差矢量幅度测量结果

测量次数	实测值(%)
1	1.58
2	1.55
3	1.56
4	1.58
5	1.57
6	1.56
7	1.55
8	1.57
9	1.58
10	1.56

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 $u_3=s=0.01\%$

C.4.4 不确定度合成

(1) 不确定度分量汇总表如下表 C.8 所示：

表 C.8 不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量				
	不确定度来源	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不确定度	1.2%	/	2	0.60%
2	矢量信号分析仪的测量分辨力误差	0.01%	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.0029%
3	校准过程中测量重复性	/	/	/	0.01%

(2) 合成标准不确定度

以上不确定度分量彼此不相关，则

$$\text{合成标准不确定度 } u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^3 u_i^2} = 0.60\%$$

(3) 扩展不确定度

扩展因子 $k=2$ ，扩展不确定度 $U=k \times u_c=1.2\%$

C.5 射频功率测量校准不确定度评定

C.5.1 测量方法

采用标准信号发生器以及功率计对星闪无线综合测试仪的射频功率测量进行校准。以使用矢量信号发生器和功率计对星闪无线综合测试仪射频功率测量进行校准为例（频率 2402MHz，功率-10dBm），进行不确定度评定。

C.5.2 不确定度来源

(1) 功率计参考功率电平最大允许误差引入的不确定度 u_{1r} ；

- (2) 功率计的线性误差引入的不确定度 u_{2r} ;
- (3) 功分器输出不平衡引入的不确定度 u_{3r} ;
- (4) 测量过程中, 连接及读数重复性引入的不确定度 u_{4r} ;
- (5) 功率计与功分器连接过程中的失配误差引入的不确定度 u_{5r} ;
- (6) 被测星闪无线综合测试仪与功分器连接过程中的失配误差引入的不确定度 u_{6r} 。

C.5.3 标准不确定度评定

- (1) 功率计参考功率电平最大允许误差引入的不确定度 u_{1r} ;

标准功率计在功率参考点上(0 dBm)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: $u_{1r}=U_{p1}/k_1=0.4\%$ 。

- (2) 功率计的线性误差引入的不确定度 u_{2r} ;

根据功率计的指标说明书, 测量线性度最大允许误差 $a_2=\pm 0.03\text{dB}$, 换算成相对误差即 $a_2=0.03/4.34\approx 0.0069=0.69\%$, 测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布 $k_2=\sqrt{3}$

标准不确定度分量 $u_{2r}=a_2/k_2=0.69\%/\sqrt{3}\approx 0.40\%$ 。

- (3) 功分器输出不平衡引入的不确定度 u_{3r} ;

根据指标说明书, 功分器两输出端的不平衡引入误差为 $\pm 0.2\text{dB}$, 即 $a_3=0.2\text{dB}$, 换成相对误差 $a_3=0.2/4.34\approx 0.046=4.6\%$, 按均匀分布, $k_3=\sqrt{3}$, 则功分器输出不平衡引入的标准不确定度分量标准不确定度 $u_{3r}=a_3/k_3\approx 2.7\%$ 。

- (4) 测量过程中, 连接及读数重复性引入的不确定度 u_{4r} ;

信号发生器输出频率 2402MHz, 调节信号发生器输出功率使得功率计显示为 0.1mW, 将此信号输入星闪无线综合测试仪, 重复测量 10 次, 测量结果如下表 C.9 所示:

表 C.9 射频功率测量结果

测量序号	实测值(mW)
1	0.0978
2	0.0976
3	0.0977
4	0.0975
5	0.0979
6	0.0983
7	0.0973
8	0.0979
9	0.0978
10	0.0975

则单次测量结果的实验标准差 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.00026\text{mW}$

标准不确定度使用实验标准差表示, 则 $u_{4r}=s=0.00026\text{mW}$ 。换算成相对值:
 $u_{4r}=s/0.1=0.0026=0.26\%$ 。

(5) 功率计与功分器连接过程中的失配误差引入的不确定度 u_{5r} ;

根据仪表的指标说明书得到, 功率计输入端口电压驻波比 <1.1 , 即 $|\Gamma_s|=0.048$, 功分器输出端口电压驻波比 ≤ 1.2 , 即 $|\Gamma_u|=0.091$, 则失配误差 $a_5=2\times 0.048\times 0.091=0.0087=0.87\%$, 测量值落在该区间内的概率分布为反正弦分布 $k_5=\sqrt{2}$ 。

标准不确定度 $u_{5r}=a_5/k_5\approx 0.0062=0.62\%$

(6) 被测星闪无线综合测试仪与功分器连接过程中的失配误差引入的不确定度 u_{6r} 。

根据仪表的指标说明书得到, 功分器输出端口电压驻波比 ≤ 1.2 , 即 $|\Gamma_u|=0.091$, 被测星闪无线综合测试仪输入输出端口电压驻波比 <1.5 , 即 $|\Gamma_s|=0.20$, 则失配误差 $a_6=2\times 0.091\times 0.20=0.0364=3.64\%$, 测量值落在该区间内的概率分布为反正弦分布 $k_6=\sqrt{2}$

标准不确定度 $u_{6r}=a_{6r}/k_6\approx 0.0257=2.6\%$ 。

C.5.4 不确定度合成

(1) 不确定度分量汇总表如下表 C.10 所示:

表 C.10 不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量				
	不确定度来源	测量误差或准确度	分布类型	包含因子	标准不确定度
1	功率计参考功率电平最大允许误差	1.1%	/	2	0.4%
2	功率计的线性误差	0.69%	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.40%
3	功分器输出不平衡	4.6%	均匀分布	$\sqrt{3}$	2.7%
4	连接及读数重复性	/	/	/	0.26%
5	功率计与功分器连接过程中的失配误差	0.87%	反正弦分布	$\sqrt{2}$	0.62%
6	被测星闪无线综合测试仪与功分器连接过程中的失配误差	3.64%	反正弦分布	$\sqrt{2}$	2.6%

(2) 合成标准不确定度

以上不确定度分量彼此不相关, 则

$$u_r = \sqrt{\sum_{i=1}^6 u_{ir}^2} \approx 3.9\%$$

即 $u=0.17\text{dB}$

(3) 扩展不确定度

扩展因子 $k=2$, 扩展不确定度 $U=k\times u=0.34\text{dB}$ 。

C.6 误差矢量幅度测量校准不确定度评定

参照 C.4 误差矢量幅度校准不确定度评定

附录 D

星闪技术概述

D.1 星闪技术概述

星闪无线通信技术是一种无线短距通信技术，用于承载智能汽车、智能家居、智能终端以及智能制造等领域应用场景的数据交互。星闪无线通信系统由星闪接入层、基础服务层以及基础应用层三部分构成。其中星闪接入层也可被称为星闪底层，基础服务层和基础应用层构成了星闪上层，如图 D.1 所示。

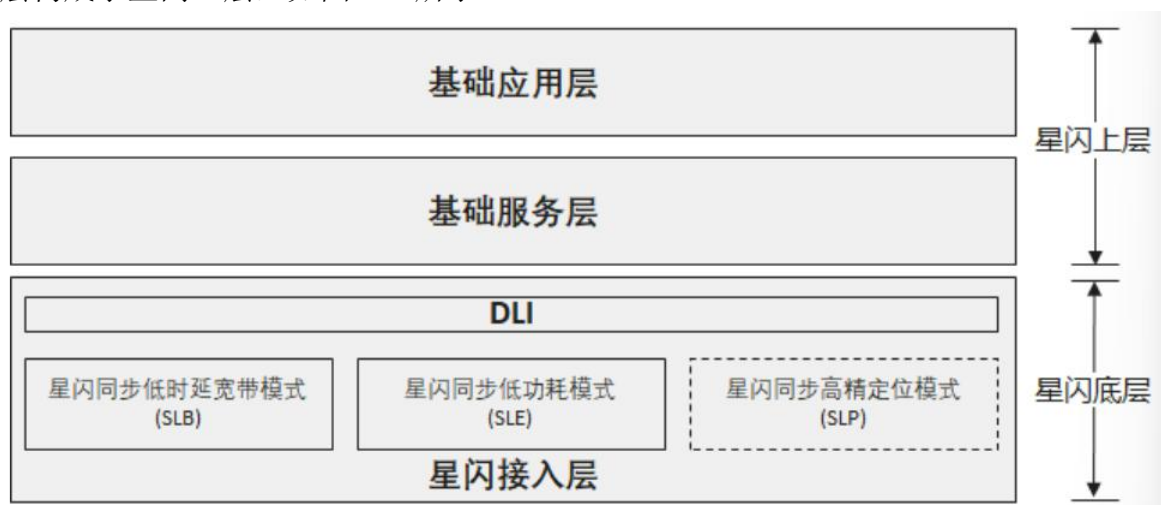


图 D.1 星闪无线通信系统示意图

星闪接入层根据实现功能的不同分为管理节点(G 节点)和终端节点(T 节点)，其中 G 节点为其覆盖下的 T 节点提供连接管理、资源分配、信息安全等接入层服务。星闪接入层实现了 G 节点和 T 节点的上层业务数据在空口的传输交互。星闪标准化了底层与上层的接口即数据连接接口，支持星闪同步低时延宽带模式 SLB(Synchronous Low Latency Broadband, SLB)和星闪同步低功耗模式(Synchronous Low Energy, SLE)。

SLB 采用超短帧、多域同步、双向认证、快速干扰协调、双向认证加密、跨层调度优化等多项技术，用于支持具有低时延、高可靠、精同步、高并发和高安全等传输需求的业务场景。

SLE 采用 Polar 信道编码提升传输可靠性，减少重传节省功耗，同时支持最大 4MHz 传输带宽、最大 8PSK 调制，支持 1 对多可靠组播，支持 4kHz 短时延交互等特性，在尽可能保证传输效率的同时，充分考虑了节能因素，用于承载具有低功耗诉求的业务场景。

星闪同步高精度定位模式 SLP(Synchronous Link Positioning, SLP)采用全新帧格式、更高脉冲功率、超宽带随机启动、CTS 安全加密等多项技术，提供测距、测角等定位功能和存在感知、目标跟踪、行为感知等感知功能，并具有宽窄带融合、窄带提供同步与数传的能力，具有能耗更低的优势。SLP 是一种非独立组网(Non-Standalone, NSA)模式，需结合 SLE 或 SLB 进行工作，SLP 所需的空口交互信令由 SLB 或 SLE 数据链路层发送，SLP 通过 SLE 或 SLB 的数据连接接口与基础服务层交互。

D.2 波形和调制符号

D.2.1 高斯频移键控(Gaussian Frequency Shift Keying, GFSK) 调制

GFSK 调制采用带宽和比特周期乘积 $BT=0.5$ ，调制系数在 0.45 和 0.55 之间。比特 1 表示为正频偏，比特 0 表示为负频偏。过零点差必须在理想过零点时间的 $\pm 1/8$ 符号间隔内。

GFSK 调制波形示意图见图 D.2。

带宽 0.1MHz GFSK 的符号间隔是 $10\mu\text{s}$ ，最小频偏要求不小于 23.125kHz。

带宽 0.125MHz GFSK 的符号间隔是 $8\mu\text{s}$ ，最小频偏要求不小于 46.25kHz。

带宽 0.25MHz GFSK 的符号间隔是 $4\mu\text{s}$ ，最小频偏要求不小于 92.5kHz。

带宽 0.5MHz GFSK 的符号间隔是 $2\mu\text{s}$ ，最小频偏要求不小于 185kHz。

带宽 1MHz GFSK 的符号间隔是 $1\mu\text{s}$ ，最小频偏要求不小于 185kHz。

带宽 2MHz GFSK 的符号间隔是 $0.5\mu\text{s}$ ，最小频偏要求不小于 370kHz。

带宽 4MHz GFSK 的符号间隔是 $0.25\mu\text{s}$ ，最小频偏要求不小于 740kHz。

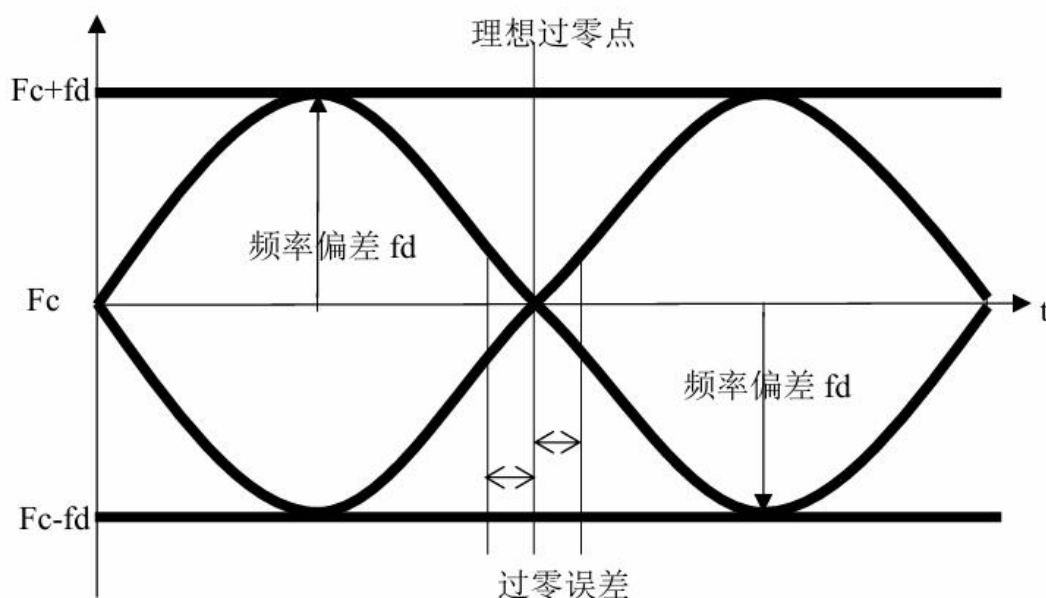


图 D.2 GFSK 调制波形示意图

D.2.2 PSK 调制和导频相位

调制方式 PSK 分为 BPSK、QPSK、8PSK 三种类型：

BPSK 调制：比特 0 表示为 90° 相位，比特 1 表示为 -90° 相位，导频符号使用 90° 相位。在偶数符号时，额外增加顺时针 90° 相位旋转；

QPSK 调制：比特 00 表示为 45° 相位，比特 01 表示为 135° 相位，比特 11 表示为 -135° 相位，比特 10 表示为 -45° 相位，导频符号使用 45° 相位。在偶数符号时，额外增加顺时针 45° 相位旋转；

8PSK 调制：比特 000 表示为 22.5° 相位，比特 001 表示为 67.5° 相位，比特 011 表示为 112.5° 相位，比特 010 表示为 157.5° 相位，比特 110 表示为 -157.5° 相位，比特 111 表示为 -112.5° 相位，比特 101 表示为 -67.5° 相位，比特 100 表示为 -22.5° 相位，导频符号使用 22.5° 相位。在偶数符号时，额外增加顺时针 22.5° 相位旋转。

无相位旋转的 BPSK 调制：比特 0 表示为 0° 相位，比特 1 表示为 180° 相位。

当被调制比特序列与调制符号比特数不对齐时，在被调制比特序列的末尾补充填充比特，对齐调制符号比特数。

PSK 调制采用平方根升余弦脉冲整形生成低通基带信号，公式如下 D1 所示：

$$|P(f)| = \begin{cases} 1 & 0 \leq |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \sin \left(\frac{\pi(2|f|T-1)}{2\beta} \right) \right)} & \frac{1-\beta}{2T} \leq |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (D1)$$

式(D1)中： $P(f)$ ----平方根升余弦滤波器的频域幅度响应，幅度为归一化值；

f ----载波频率， MHz；

T ----符号周期， μs ；

β ----滚降系数， $\beta=0.4$ 。

带宽 0.1MHz PSK 信号符号周期是 $10\mu\text{s}$ ，带宽 0.125MHz PSK 信号符号周期是 $8\mu\text{s}$ ，带宽 0.25MHz PSK 信号符号周期是 $4\mu\text{s}$ ，带宽 0.5MHz PSK 信号符号周期是 $2\mu\text{s}$ ，带宽 1MHz PSK 信号符号周期是 $1\mu\text{s}$ ，带宽 2MHz PSK 信号符号周期是 $0.5\mu\text{s}$ ，带宽 4MHz PSK 信号符号周期是 $0.25\mu\text{s}$ 。