



基于RFSOC的MKID阵列微波复用读出原型系统

张煜铖，王远达，刘显科，殷伟刚*，陈凯*

全国核电子学与核探测技术学术年会 NED2026



1. MKID探测器与读出需求

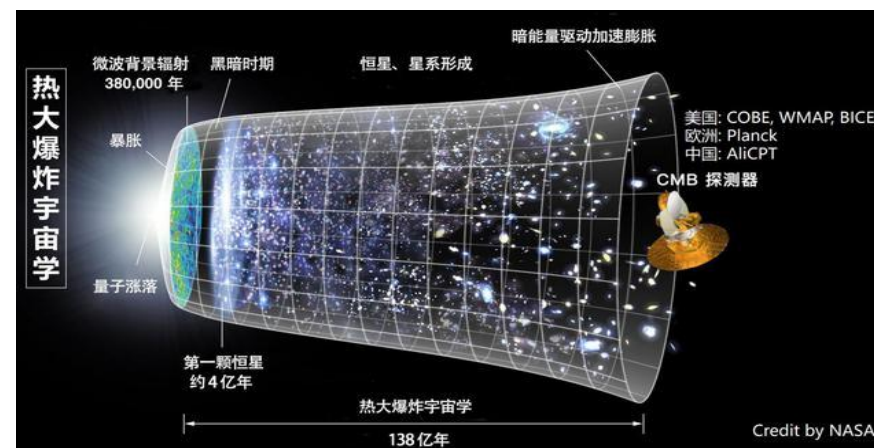
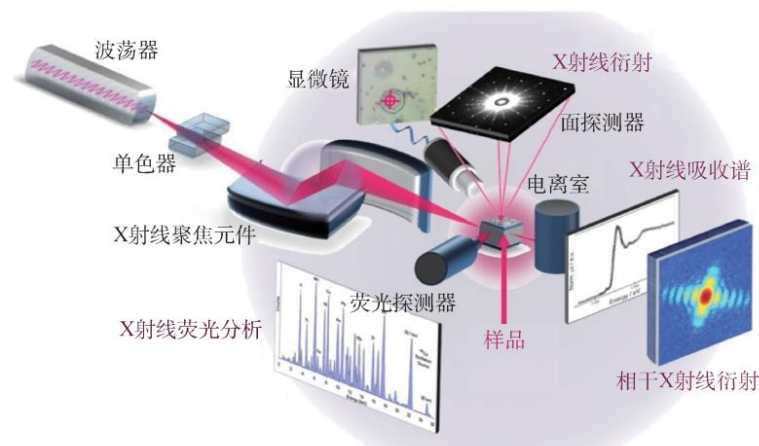
2. MKID阵列读出原型系统

3. 初步测试结果

4. 总结

先进探测设备需求

- 量子科学, 射线谱学, 天文科学等学科都对先进光子探测设备有着极大的需求



探测设备:

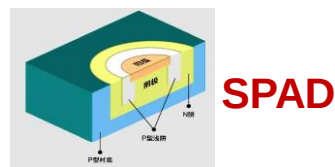
- 精细谱分辨 -> 更高的能量分辨
- 高时间分辨 -> 更高的探测效率
- 高位置分辨 -> 多像素阵列

◆ **低温光子探测器**是当前先进光子探测器技术的重要研究方向

- **低温超导光子探测器**通过深度制冷抑制热噪声和热激发，可实现低噪声、高灵敏度的微弱光信号探测，在尖端科研领域应用广泛。
- **典型低温光子探测器**：超导纳米线探测器(SNSPD)，超导相变边沿探测器(TES)，超导动态电感探测器(MKID)
- **大规模阵列探测需求**对电子学功能和性能提出严峻挑战

室温探测器

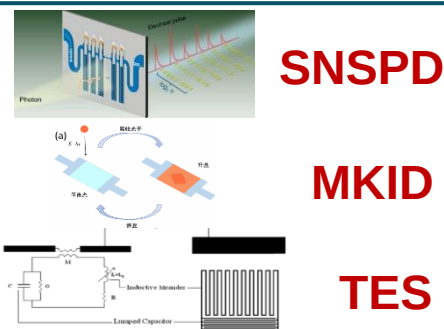
- 热噪声导致性能瓶颈
- 暗计数率高



降温 ↓

低温探测器

- 热激发抑制
- 暗计数断崖式下降
- 近完美的探测性能

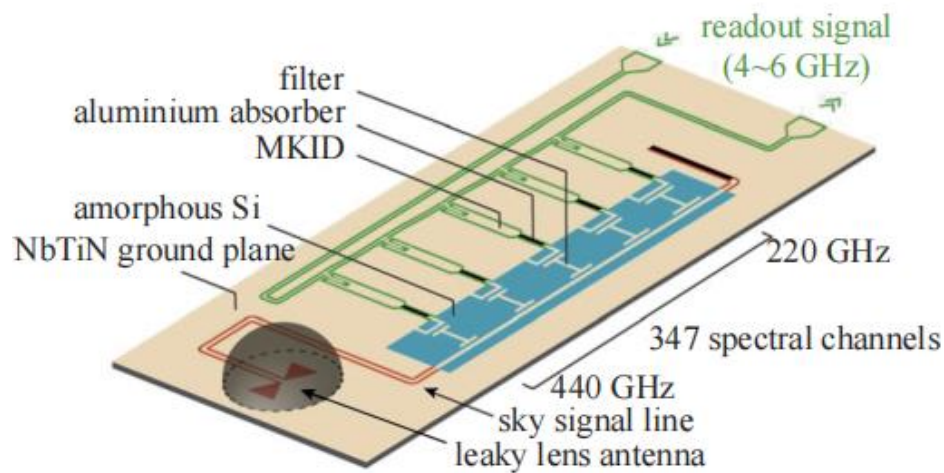


- **SNSPD**时间分辨高，阵列布线复杂，限制了规模扩展
- **TES**能量分辨率高，具备阵列化能力。但**技术复杂**，需要额外器件协助读出。
- **MKID天然支持阵列化**，适合大规模单光子探测阵列部署

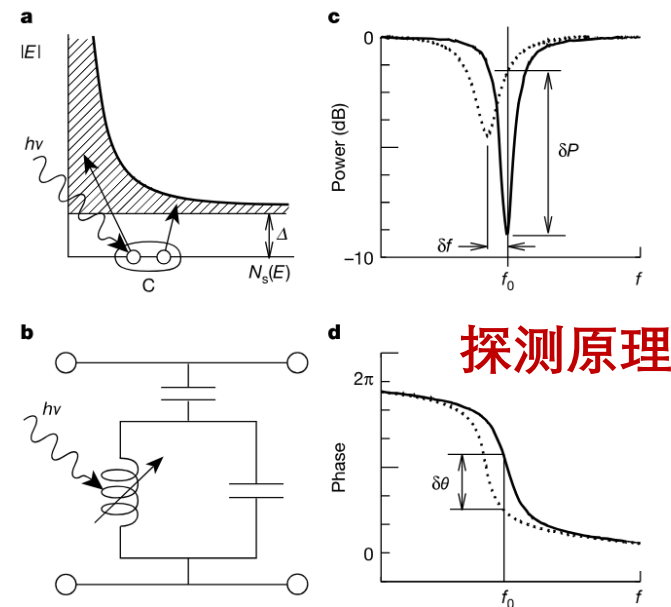
- 2003年,《Nature》发表论文[Peter K Day et al. Nature, 2003.], 首先提出了称为微波动态电感探测 (microwave kinetic inductance detection, **MKID**) 的新型超导光子探测器, **是一种频率读出型探测器。**

■ MKID基本原理

- 超导微波谐振器->超导薄膜吸收光子->超导库珀对被破坏->形成准粒子->谐振器动态电感变化->**探测器谐振频率改变。**
- 电子学设备**获取通道正向传输参数S21**的变化, 由此计算入射光子能量。



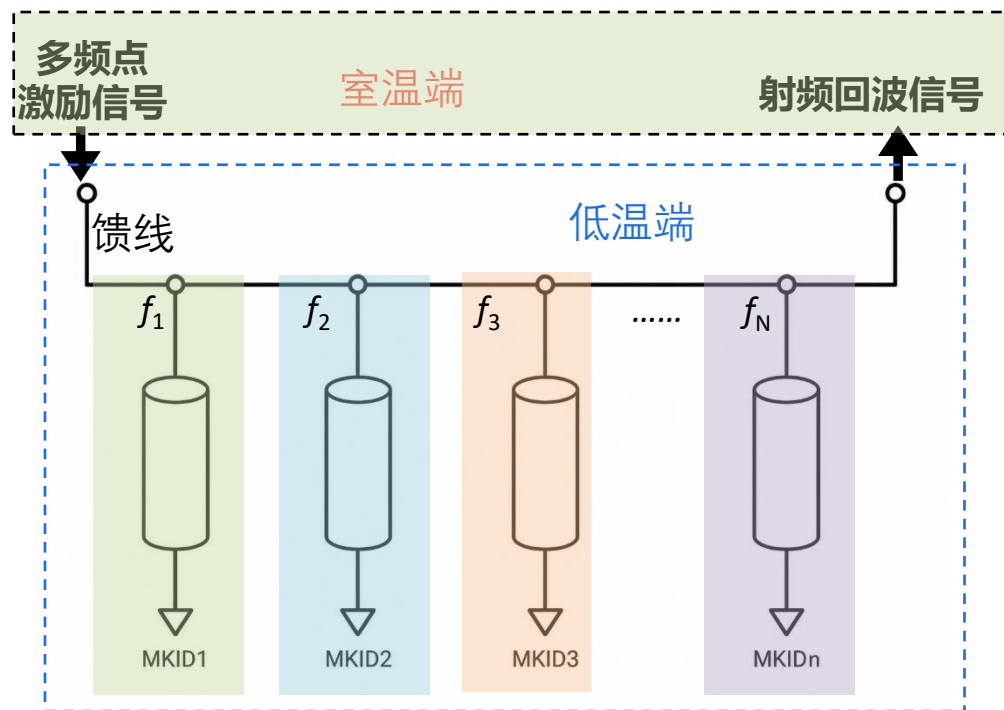
探测器结构图



MKID微波复用读出基本原理

MKID探测器具有**本征频分复用特性**:

- 不同的MKID探测器具有不同的谐振频点 ($f_1, f_2, \dots, f_n$)
- 多个MKID探测器**并联到同一根射频传输线(馈线)**上
- 不同通道的谐振频率在频谱上彼此分离, 且互不重叠
- 向馈线输入端输入携带谐振频点的多频点激励, 采集回波信号计算S21

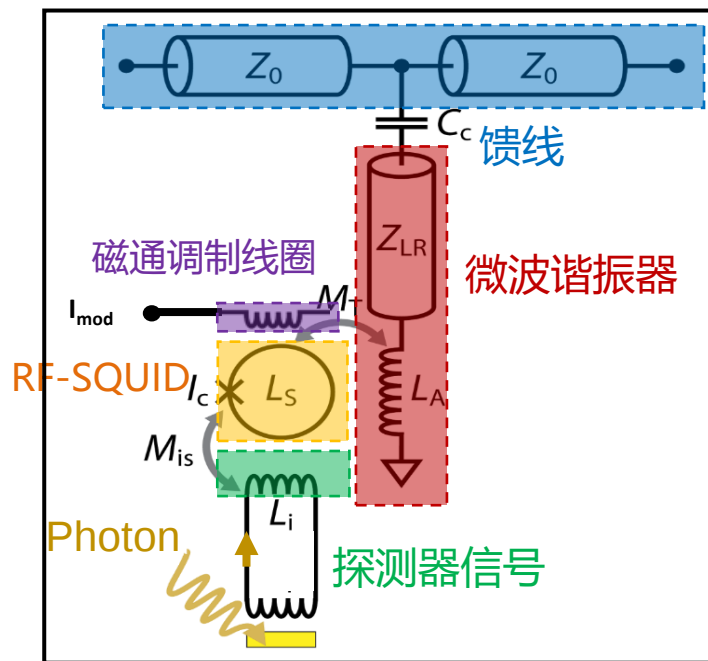


电子学

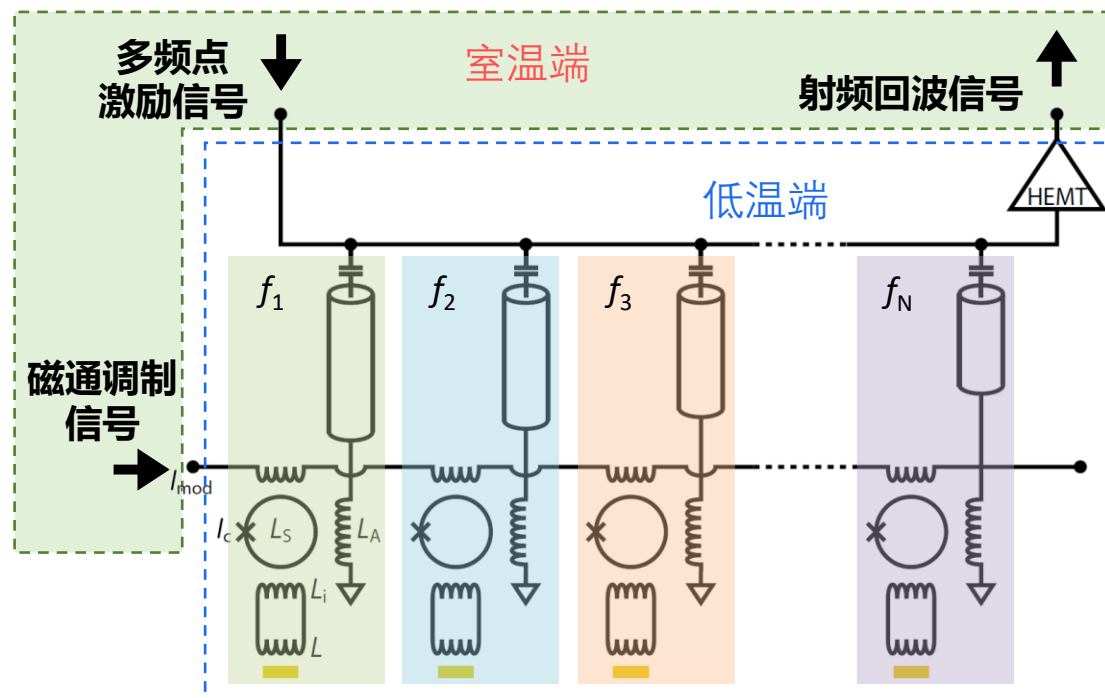
1. 扫频标定参数
2. 产生多频点激励
3. 采集射频回波信号
4. 实时S21计算
5. 数据上传

TES探测器与 μ MUX微波复用读出

- TES借助 μ MUX技术，将事例电流信号转换为与MKID相似的频率响应
 - TES电流 $\rightarrow$ RF-SQUID磁通变化 $\rightarrow$ 微波谐振频率变化
- 单通道转换：事例引起的TES电流变化经输入线圈耦合至RF-SQUID，进而改变微波谐振器的谐振频率
- μ MUX芯片：多个不同谐振频率的“RF-SQUID+谐振器”耦合至同一馈线



μ MUX器件单通道结构示意图



μ MUX芯片读出示意图

MKID阵列读出与TES微波复用读出

共同点:

- 光子事件最终都表达为谐振器的谐振频点偏移
- 二者都根据馈线的S21实现光子测量

不同点:

- MKID具有本征频分复用特性, TES需 μ MUX芯片实现微波复用读出
- MKID无需额外电压偏置, TES需要电压偏置将电阻变化转化为电流变化
- MKID可直接利用 S21 幅相响应重建事件, TES+ μ MUX通常需要磁通斜坡调制和同步解调

两者电子学平台可实现平台级复用,

本工作构建的读出原型系统具备向 TES+ μ MUX 扩展的基础



1. MKID探测器与读出需求

2. MKID阵列读出原型系统

3. 初步测试结果

4. 总结

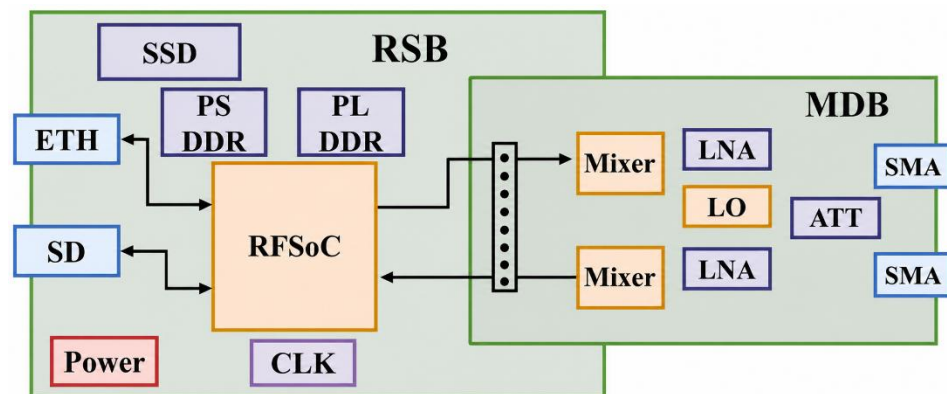
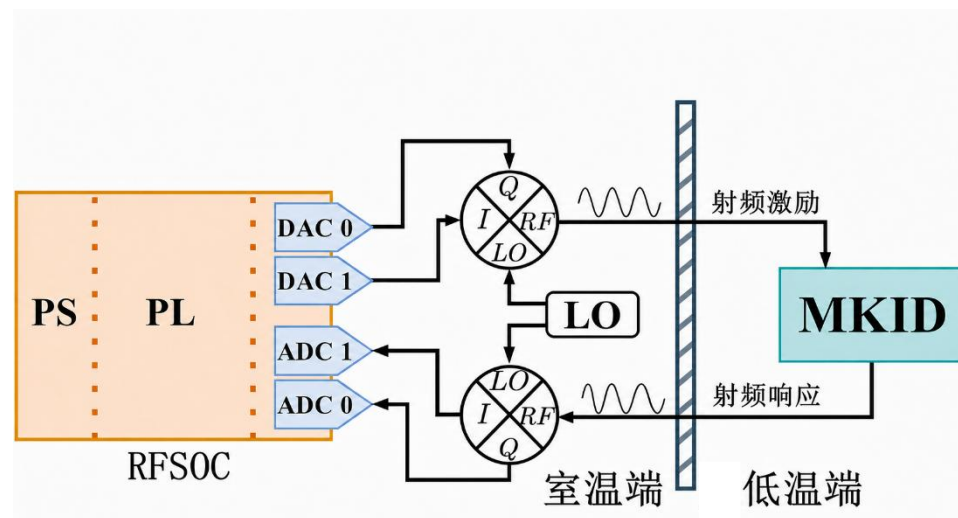
- 将系统划分为两个互连板卡，保证系统集成度，便于系统更新和扩展

载板：

- 以RFSoc芯片为整个系统的核心器件，设计基带处理核心板卡 RSB (RFSoc Board)

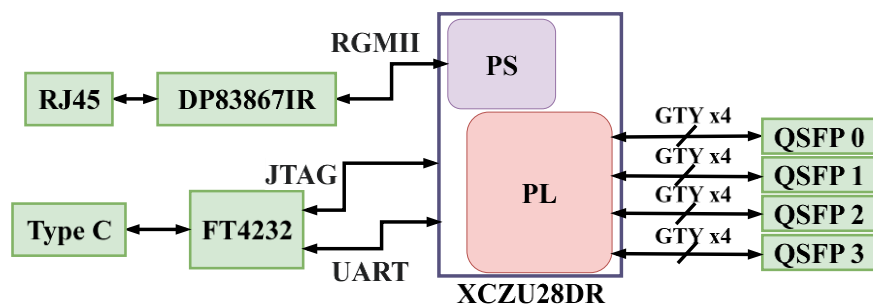
子卡：

- 混频板卡 (MDB, Mixer Daughter Board)
实现“中频-射频”直接的转换
调理链路信号功率



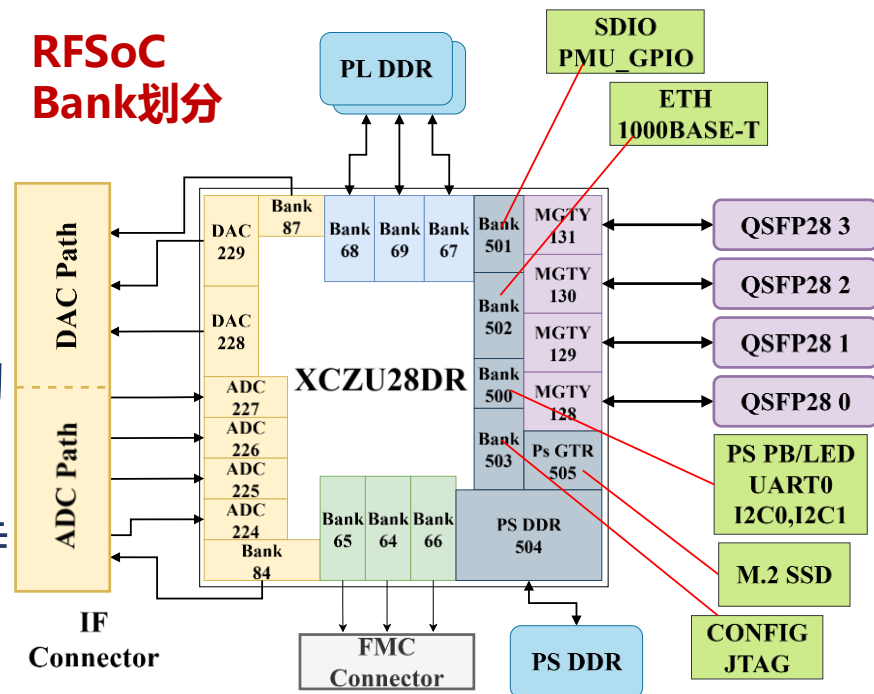
RSB板卡:

- 两个IO Bank 连接至混频板连接器, 用以实现RFSoc对混频板的控制
- PS端Bank连接至以太网, UART, JTAG接口, 实现板卡与外部PC之间的通信
- PS端连接TF卡, DDR、SSD, 以支持对数据的缓存与本地数据存储
- PL端的GT Bank连接至四个QSFP端口, 为高速数据传输提供支持

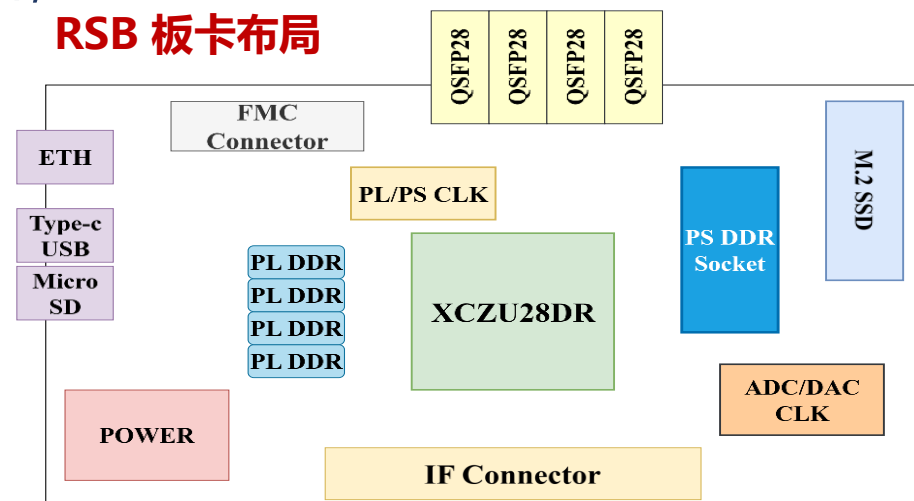


RFSoc与外部的数据传输接口

RFSoc Bank划分

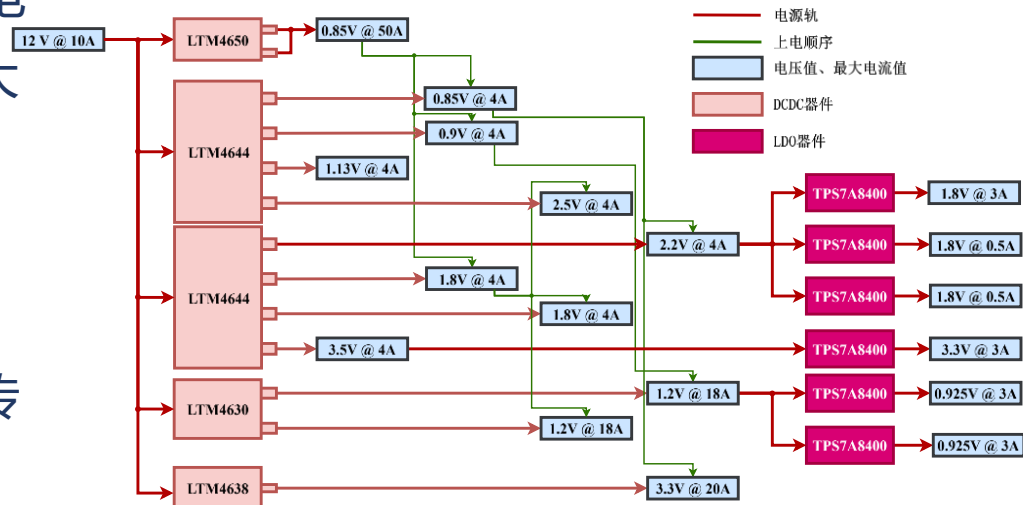


RSB 板卡布局

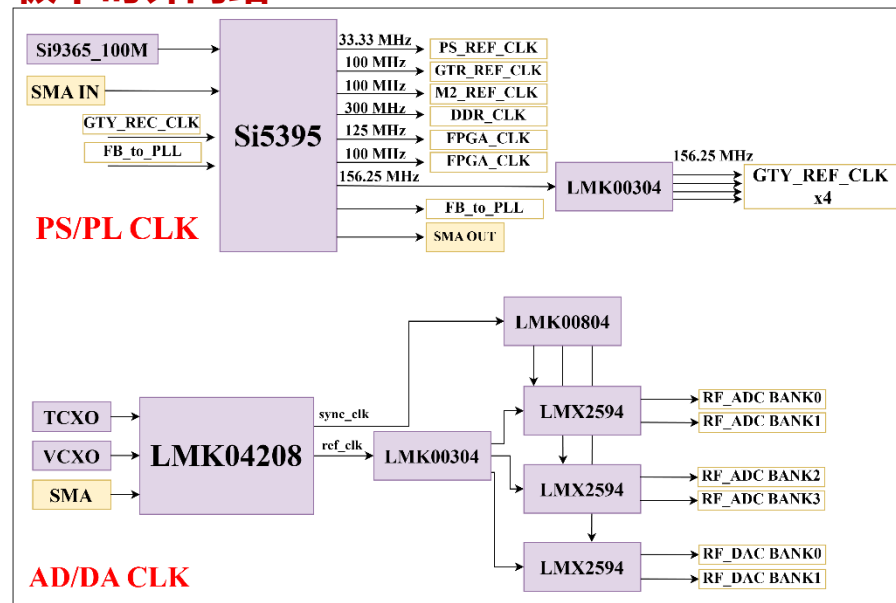


- RSB板卡整板采用12V @ 10 A的直流电源输入，RFSoc各电源轨均支持的最大电流均为仿真结果的两倍
- 为混频子板提供约20w功耗支持
- 时钟网络采用低抖动的SI5395与LMK04208时钟芯片，满足高速数据传输与高速ADC/DAC的需求

RSB板卡电源与上电顺序



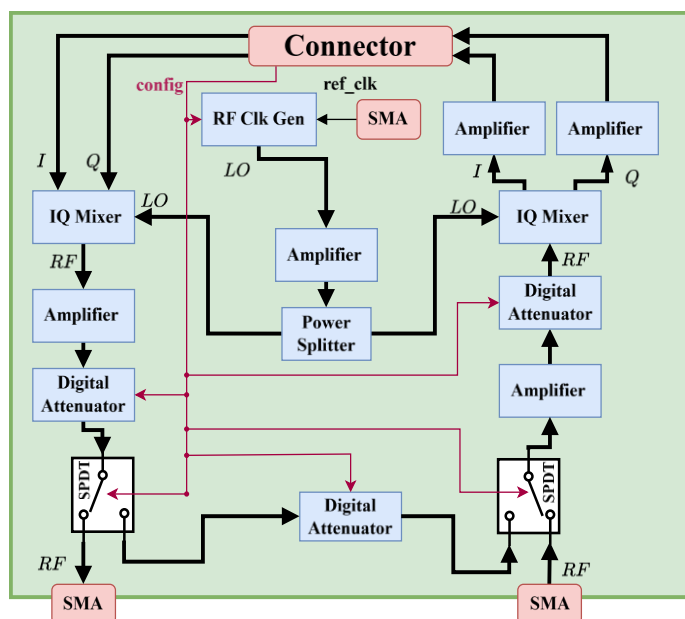
RSB板卡时钟网络



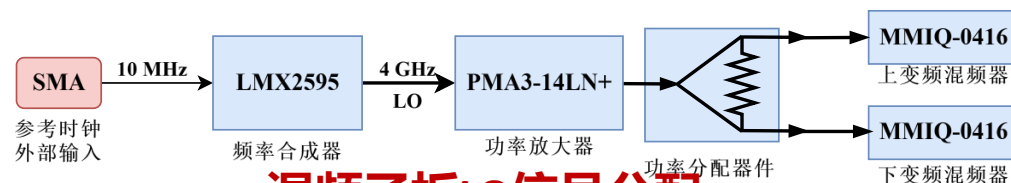
RSB板卡实物图

MDB板卡：

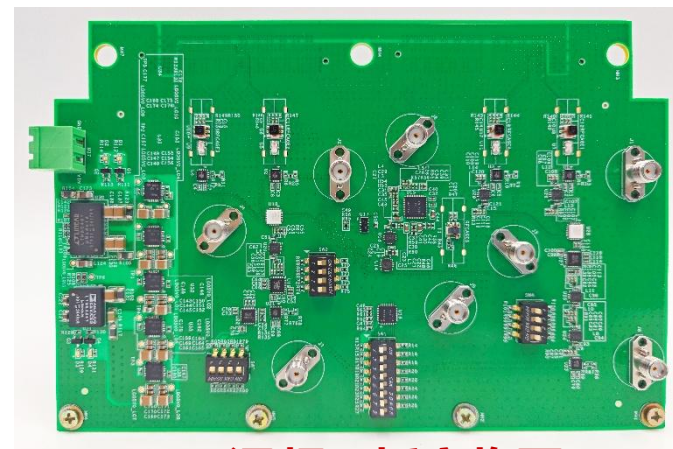
- RSB通过连接器控制MDB板卡上的本振(LO)的频率
- 以IQ复信号的形式发射/接收探针，采用IQ混频器 MMIQ-0416 实现信号的上、下变频，并利用 LMX2595 提供混频LO信号
- 功分器输出同源上变频LO与下变频LO，抑制共同 LO 相位噪声对测量的影响
- 采用数控衰减器以实时调节激励功率



混频子板电路框图



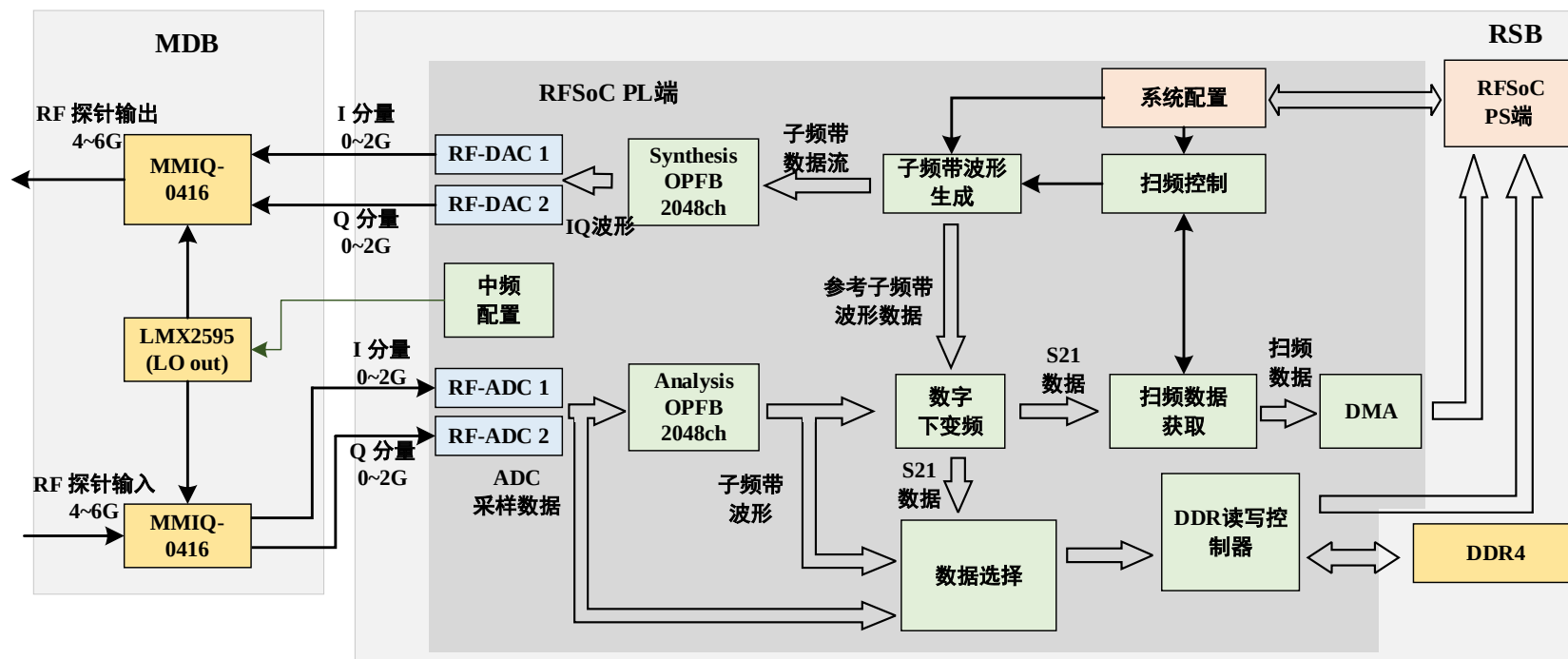
混频子板LO信号分配



混频子板实物图

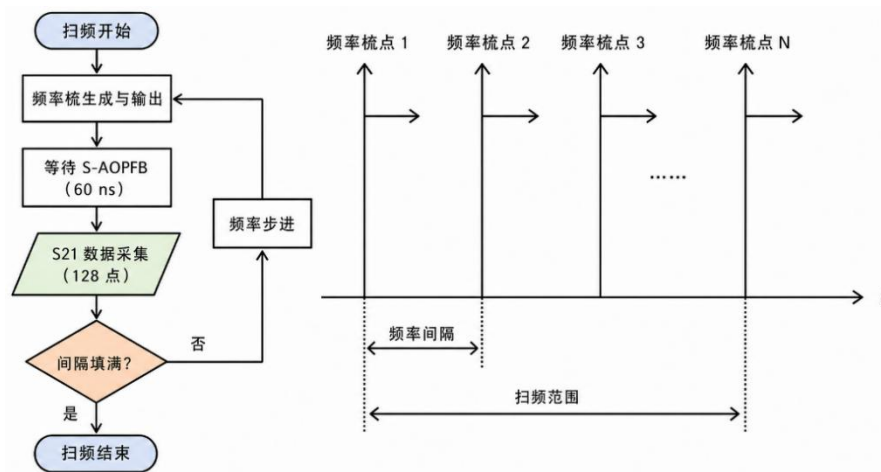
系统功能架构:

- 基带信号发生与接收采用过采样多相滤波器组(S/AOPFB)实现, 基于其对称结构, 传输系数S21计算采用直接数字下变频(DDC)实现
- 通过低速串行接口控制LO频率与上下变频的衰减, 可随实验需求实时调节
- 运行在PS端的Pynq系统读出各个中间结果数据
- 基带频带范围为0-2GHz

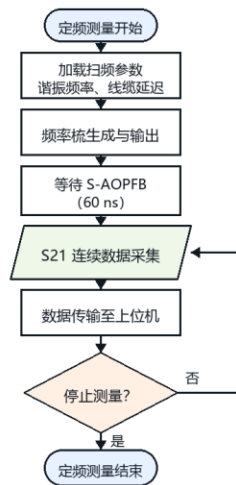


系统读出流程:

- 系统工作模式分为**扫频模式**与**物理取数模式**
- 扫频测试
 - 在特定频带范围内改变激励频率，并收集每个频率下的S21数据
 - 在上位机中**确认MKID谐振频率，线缆延迟参数**
- 物理取数
 - 固定激励频率，实时传输S21数据给上位机，在上位机中根据扫频得到的参数**实现高分辨率单光子测量**



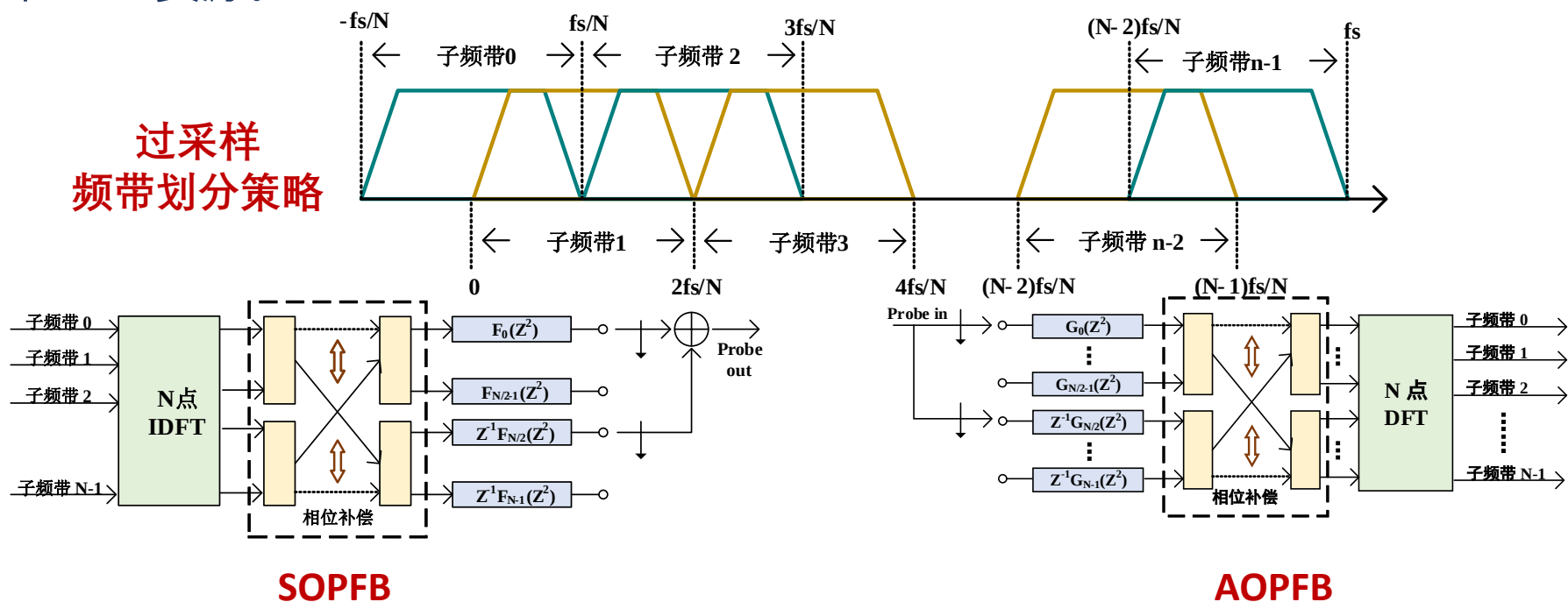
扫频测试读出流程



物理取数读出流程

过采样多相滤波器组策略:

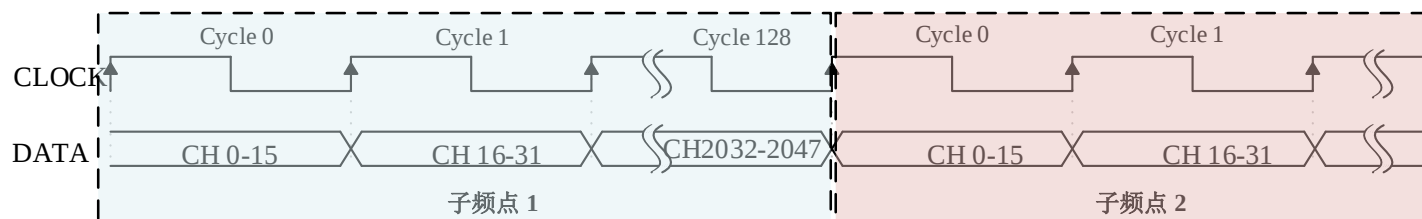
- 采用**两倍过采样设计**，抑制原型滤波器过渡区的影响，确保子带边缘的非理想特性不会干扰谐振器的测量频率。
- 0~2048MHz的频带划分为**2048个宽度为2MHz子频带**
 - 子带中心间隔为1 MHz，相邻子带存在50%重叠
- 子频带波形在2MHz低采样率下生成，避免全局高速（2Gsps）运算，大幅节省FPGA资源。



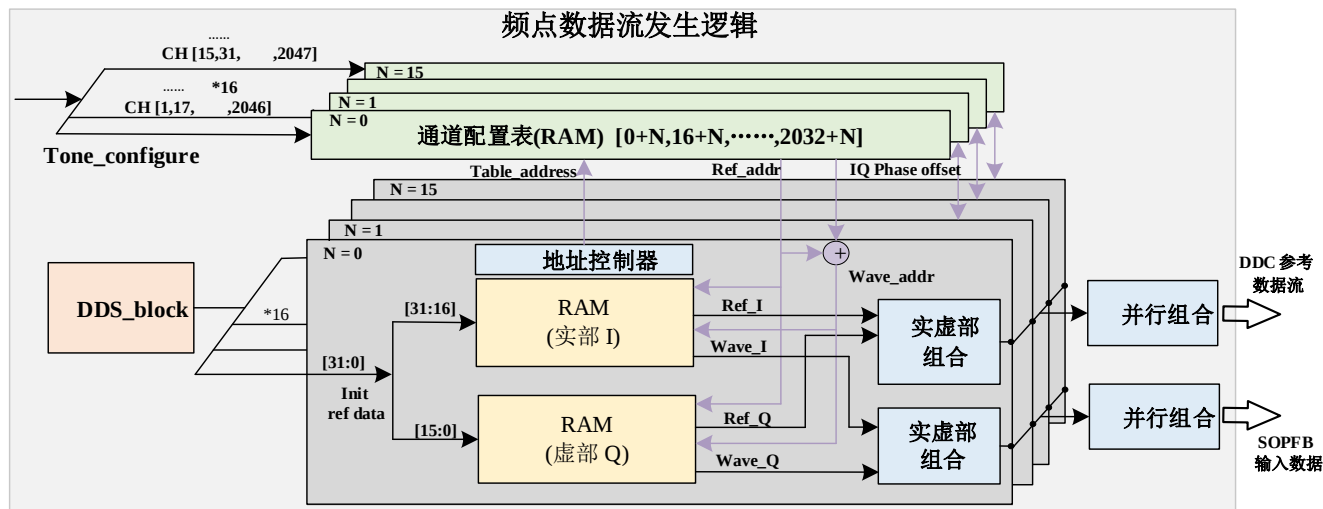
子频带波形数据流发生固件设计:

- 数据流以**16通道并行输出**，128个时钟周期完成2048个子带数据轮询
- 以单波形存储 + 变步长寻址 + **时分并行输出**的低资源方案，实现2048子带、1 kHz分辨率、最高1024通道的高速灵活频率梳生成。
- 通过**I/Q独立地址偏置**实现相位微调，低成本校正模拟链路IQ不平衡。

频点数据流格式



频点数据流发生逻辑





1. MKID探测器与读出需求

2. MKID阵列读出原型系统

3. 初步测试结果

4. 总结

电子学实验室自检测试：

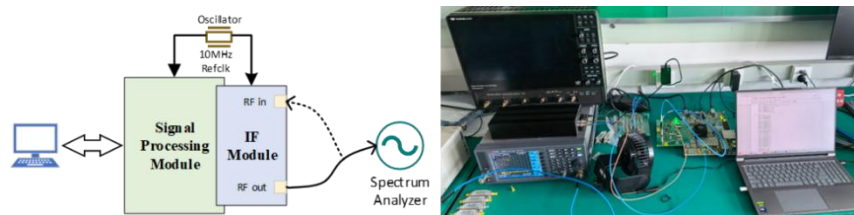
- 多频点激励发生测试
- 回环相位噪声测试

单像素探测器联调测试：

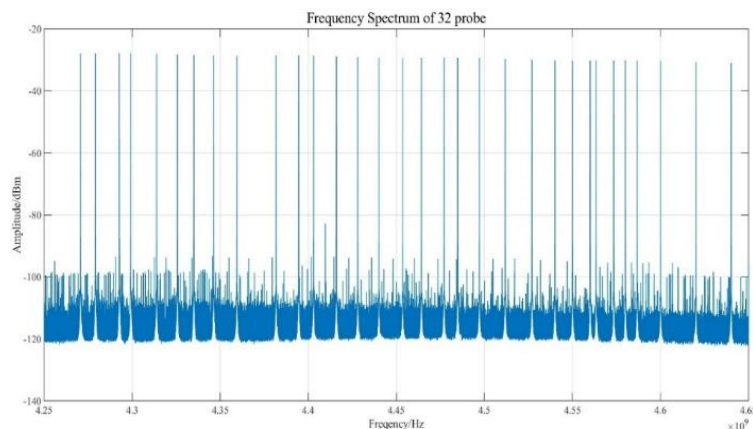
- 扫频测试
- 定频测量测试

多频点激励发生测试:

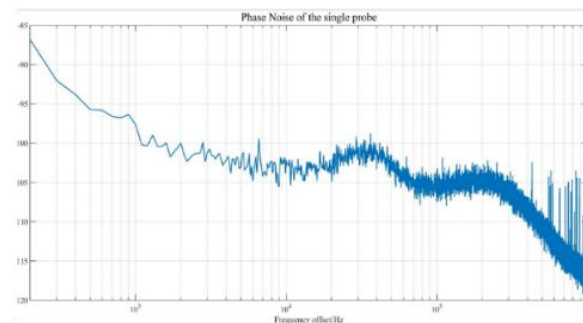
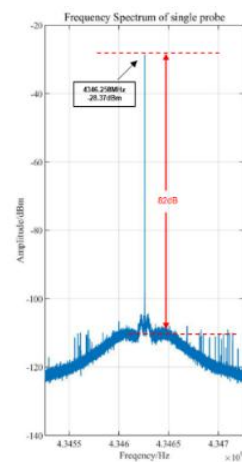
- 系统在 4.25 ~ 4.65 GHz 频段内配置 32 个频率分量,
- 采用频谱仪对系统输出的射频信号进行分析, 检查频率准确度
- 多频点输出频谱与设定频点一致
- 各频点输出功率约为 -30 dBm, 频率梳幅度一致性良好。
- 选取单频点进行测试, 输出功率为 -28.37 dBm, 动态范围达到 82 dB。



频点发生测试平台



32 频点频率梳输出频谱

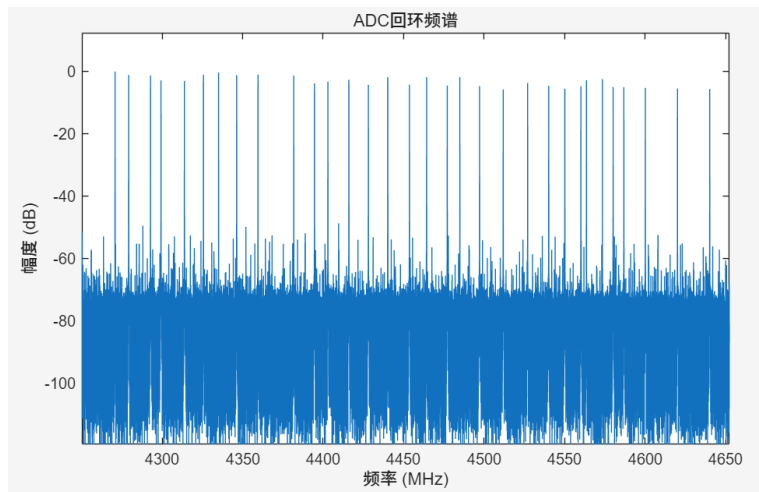


Frequency offset (Hz)	Phase Noise
1kHz	-97.62dBc/Hz
10kHz	-102.16dBc/Hz
100kHz	-103.63dBc/Hz
1MHz	-115.38dBc/Hz

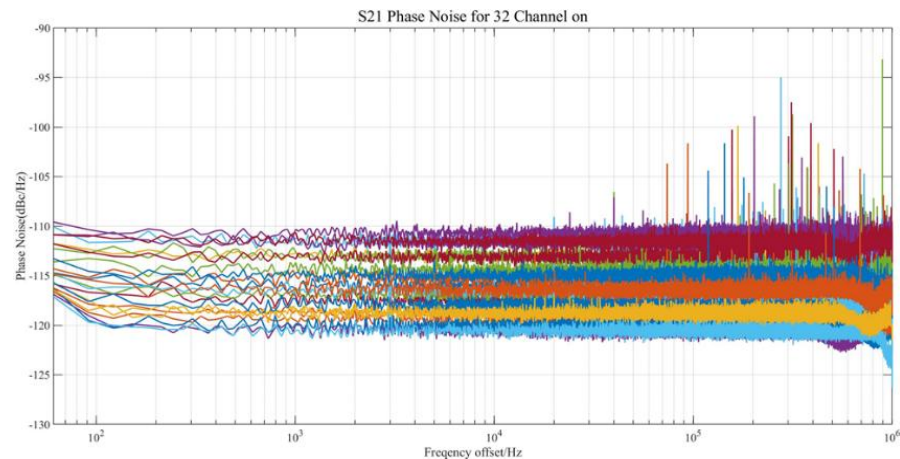
单频点动态范围与相位噪声

回环相位噪声测试:

- ADC采集波形频率分量与DAC发生激励频率一致
- 各频率分量相位噪声优于 -110 dBc/Hz



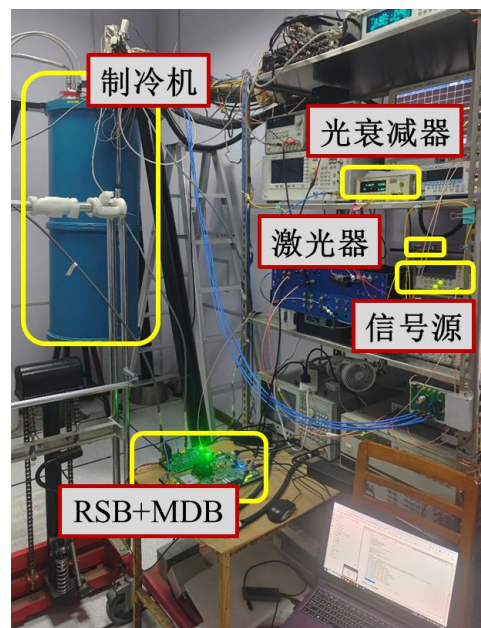
ADC采集回波信号频谱



32通道 S21 相位噪声

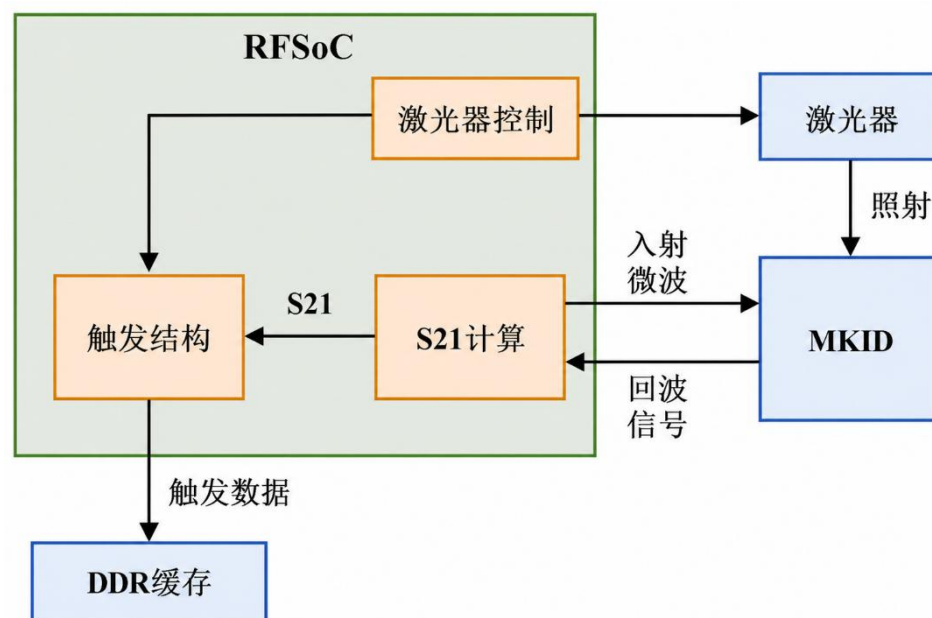
MKID单像素联调:

- 扫频测试: 系统设置为扫频模式。测试确定谐振频率, 线缆延迟
- 定频测量: 系统设置为物理取数模式。
 - 控制激光器照射MKID的灵敏区域
 - 同步触发读出事件数据



MKID测试现场

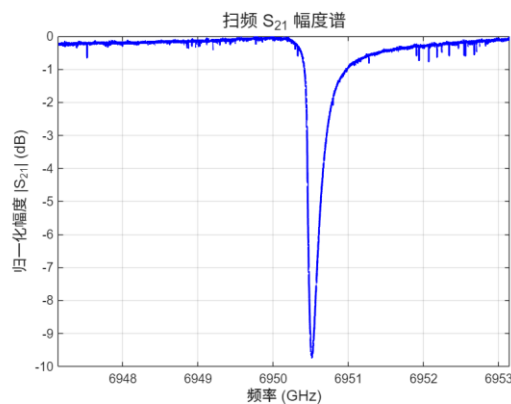
(测试条件支持: 西南交通大学)



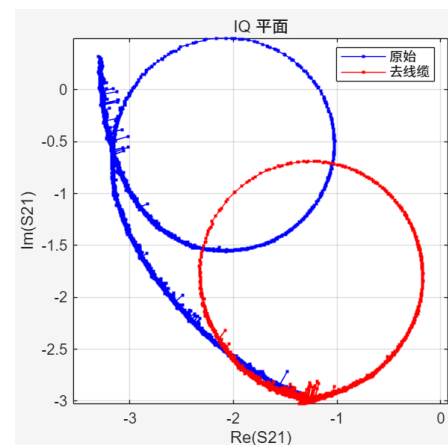
同步触发读出事件

MKID单像素扫频测试:

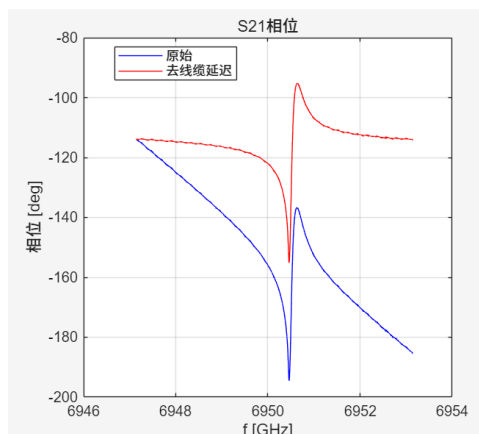
- 谐振频点为: 6950.491 MHz
- 线缆延迟为: 33 ns



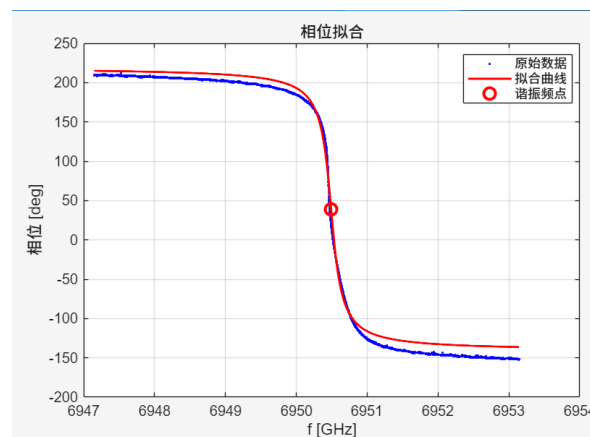
扫频 S_{21} 幅度谱



S_{21} IQ平面



扫频 S_{21} 相位谱



谐振频点拟合

MKID单像素定频测量:

- 控制1064 nm激光器产生光子照射MKID的灵敏区域
- 系统同步触发读出光子事例信号
- Matlab离线处理采集数据
- 匹配滤波实现事例幅度统计

单像素测量数据处理流程

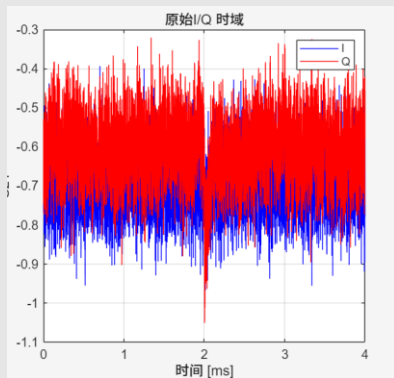
获取多组含事件 S21
(本次测试20000组)

拟合

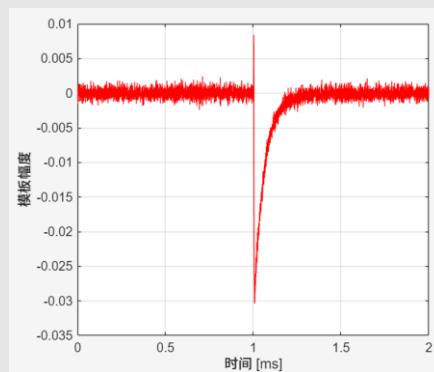
构建模板脉冲

形成滤波核

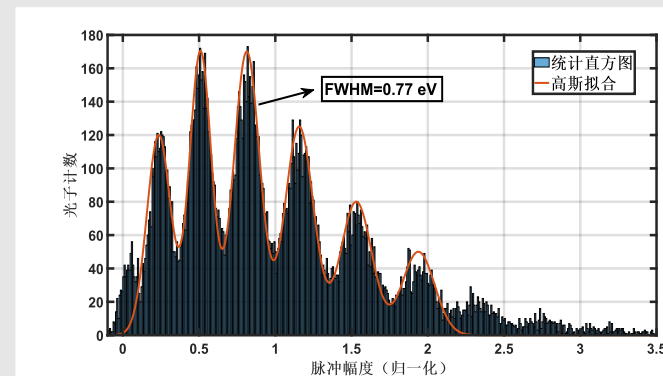
匹配滤波



单次事件时域



模板脉冲



匹配滤波后单光子谱



1. MKID探测器与读出需求
2. MKID阵列读出原型系统
3. 初步测试结果
4. 总结

目前工作：

- 已搭建RFSoc 为核心的原型系统硬件平台
- 在硬件平台基础上完成了固件设计与验证
- 初步测试结果显示系统已具备阵列化读出能力

展望：

- 推进阵列化MKID探测器联调，验证多频点读出的功能正确性
- 设计基于GPU的实时MKID光子事例重建方法
- 可现有平台基础上增加磁通斜坡调制与解调，探索向TES+ μ MUX读出的扩展



敬请批评指正！