

电子科技大学暑期课程 微波测量基础

授课教师：郭诚

西安交通大学 电子与信息工程学院

复习与回顾

对任意的测量问题，其两个基本要素是什么？

- (1) 找到一个标准
- (2) 找到一种基制，将离散的标准转化为连续可变的量，然后与标准作比较

- 什么是一个好的测量标准？
 - (1) 与自然常数或物理定律相关联
 - (2) 数值是绝对的，理论上没有误差
- 例：1秒是铯-133原子在基态下的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的时间。
- 例2：1米是光在真空中在 $(299792458)^{-1}$ s内的行程
- 例3：
$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega$$

“A ~~Diamond~~ Constant is Forever”

微波测量中的重要概念

- 1. 可测范围
- 2. 标准的传递、标定和溯源
- 3. 校准和去嵌入
- 4. 测试得到的结果究竟是什么？

频率和时间的标准：周期性运动

- 1. 频率的一级标准是什么？
- 频率所对应的国际基本单位是**时间**（一级标准），用铯-133原子的某个跃迁周期来定义。
- 2. 频率的二级标准是什么？
- 对应的二级标准是长度（尺寸），微波电路的**频率准确性**和**稳定性**通常由晶体振荡器、微波谐振腔等元件的**尺寸精度**和**高Q值特性**来保证。

功率的标准：热

- 1. 功率的一级标准是什么？
- 是热（温度），通常使用微波量热计（Calorimeters）来计量微波功率。
- 2. 用热来计量微波功率有什么好处
- 与频率无关
- 3. 常用的微波功率计一般是基于什么原理？如何给它定标？
- 通常采用二极管检波器，通过Transfer Power meter进行标准传递

阻抗的标准：长度（与自然常数/材料特性）

- 1. 什么是阻抗，自由空间波阻抗和特征阻抗？
- 2. 阻抗的标准是什么？
- 3. 自由空间波阻抗的标准是什么？
- 4. 特征阻抗的标准是什么？

$$Z = \frac{U}{I}$$

阻抗

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega$$

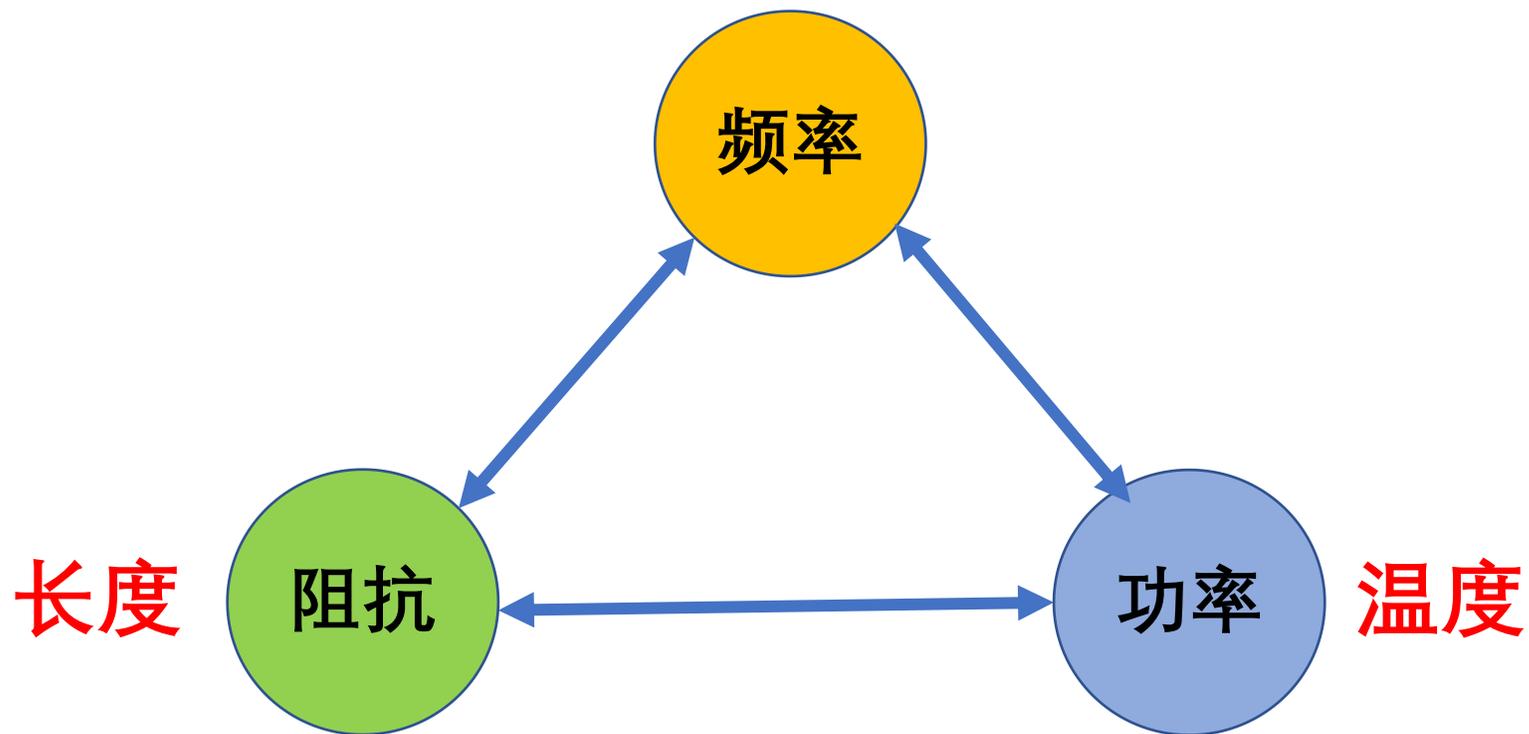
自由空间
波阻抗

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

传输线特
征阻抗

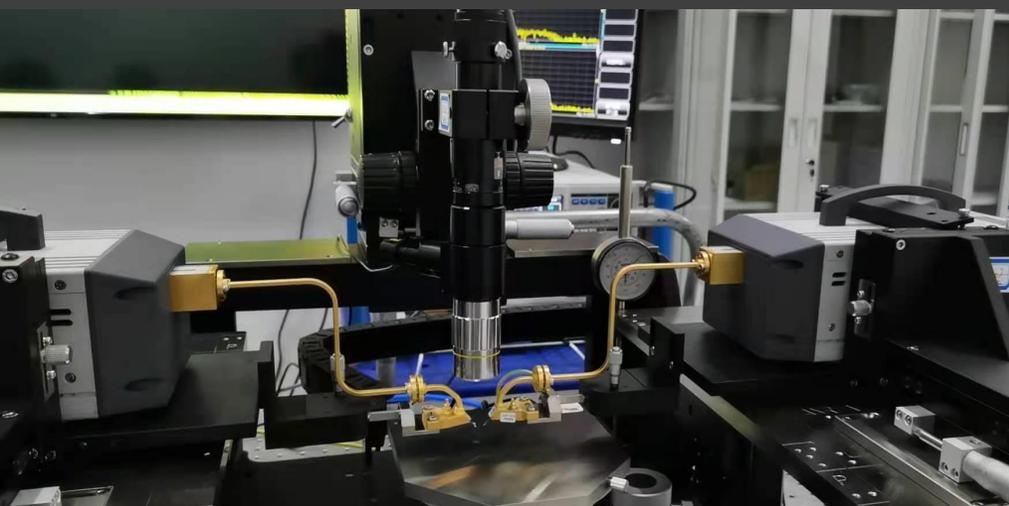
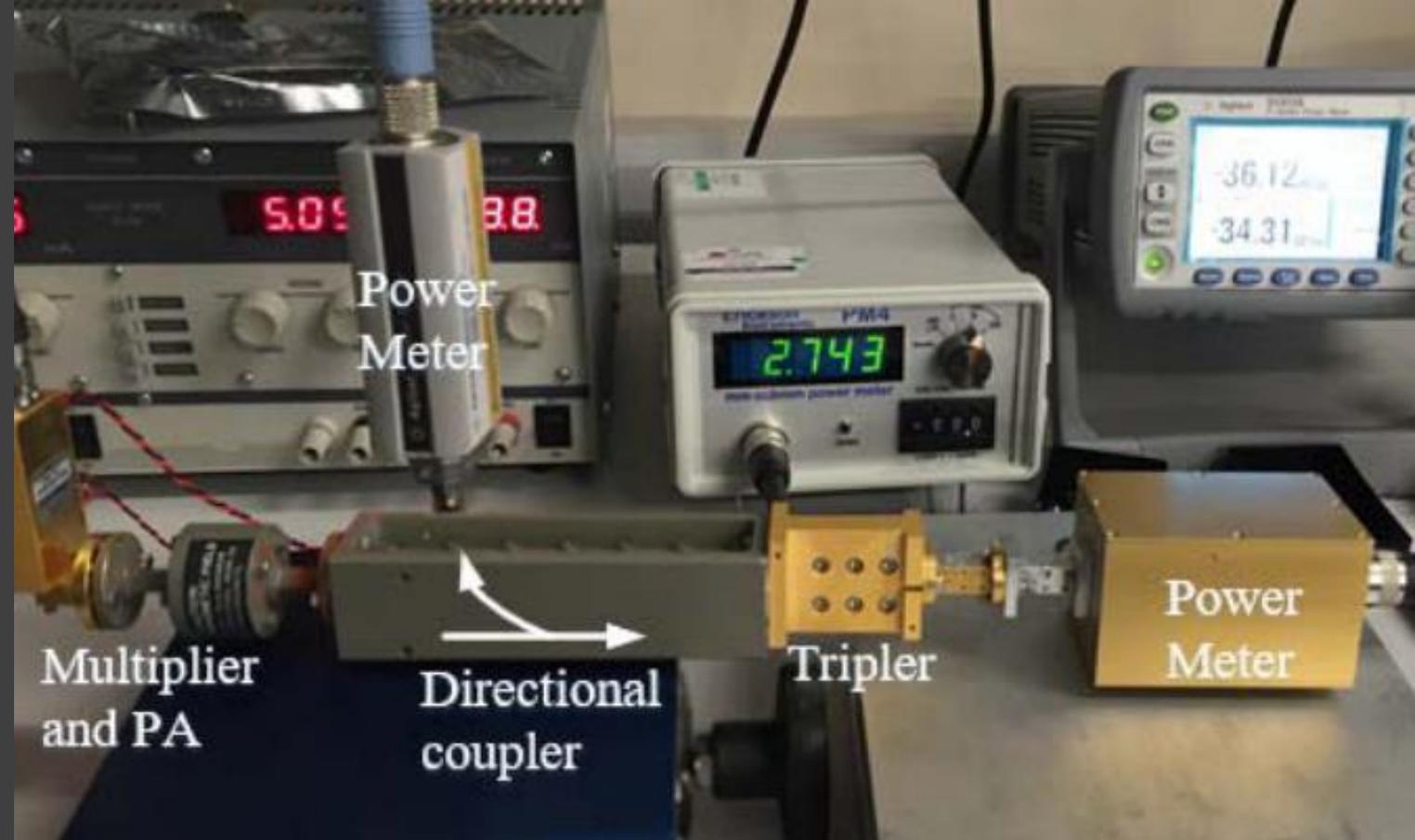
微波测量中的“基本单位”与国际单位

时间->长度



材料
介质
参数

噪声

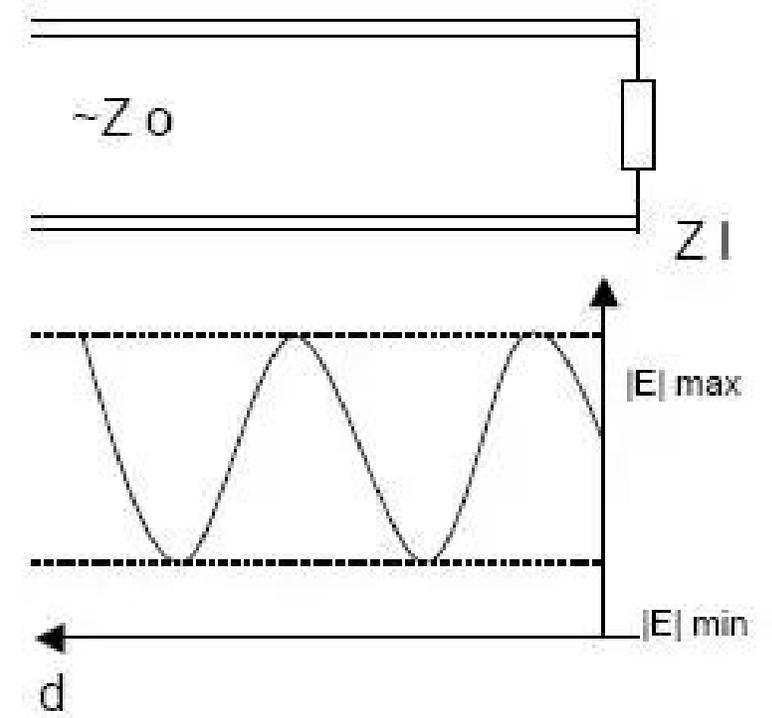
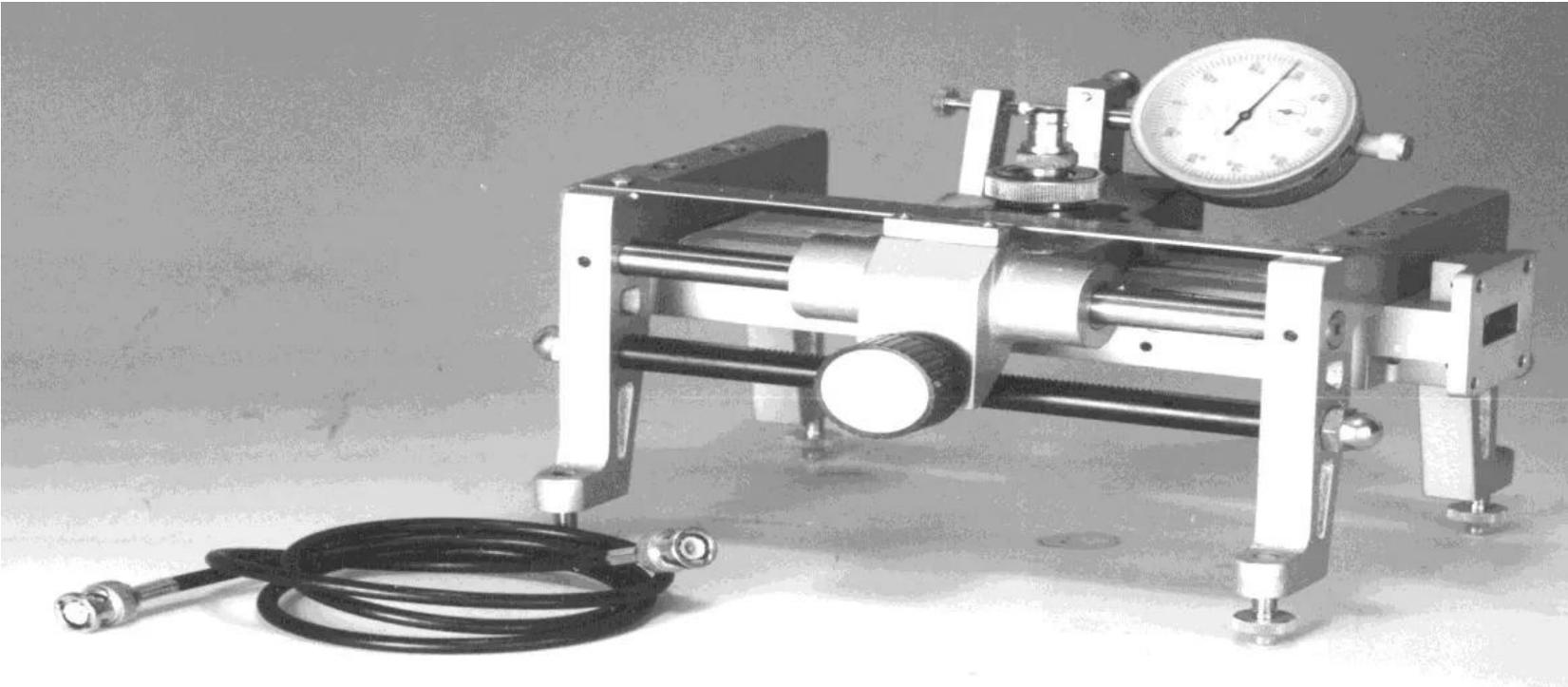


第二讲：S参数测试

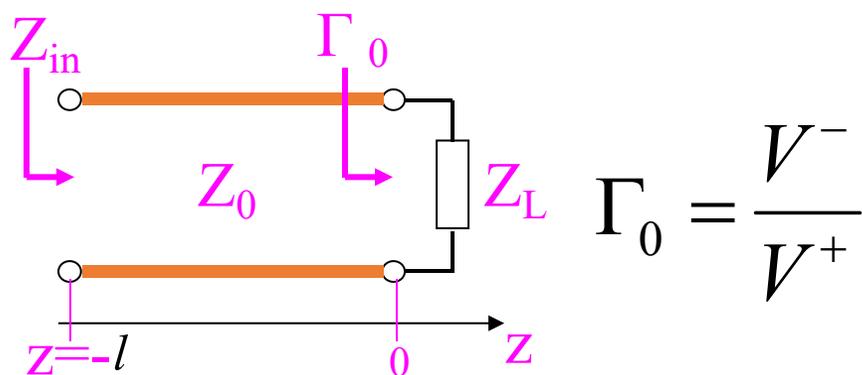
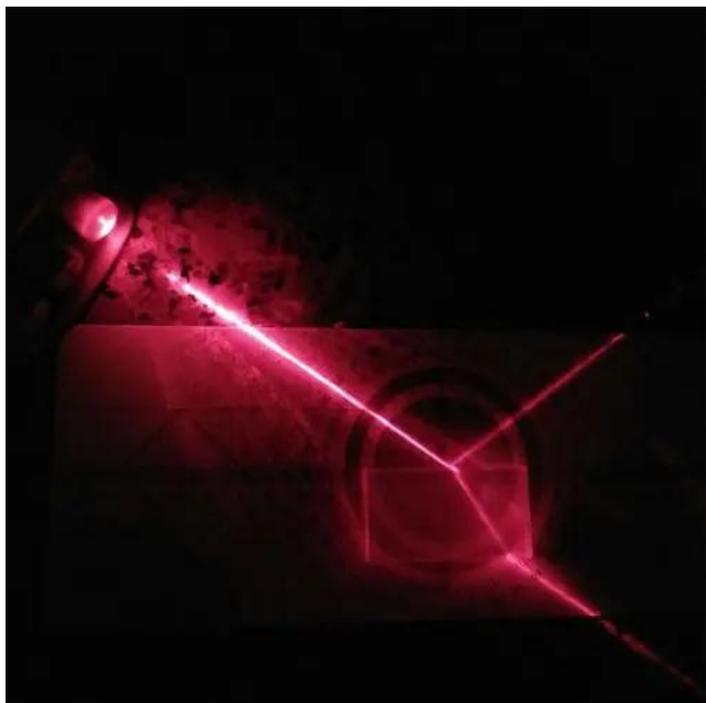
授课教师：郭诚

引子：Measurement Reality View of Niels Bohr

从驻波比到反射系数再到S参数



引子：无所不在的反射



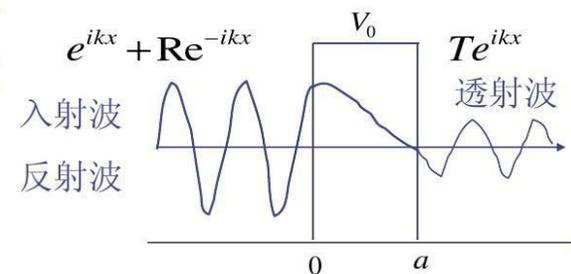
◆ 解代数方程，得到 $|R|^2 + |T|^2 = 1$

$$A = \frac{T}{2} \left(1 + \frac{ik}{\beta}\right) e^{(ik-\beta)a} \quad |T|^2 = \frac{4k^2 \beta^2}{(k^2 + \beta^2)sh^2 \beta a + 4k^2 \beta^2}$$

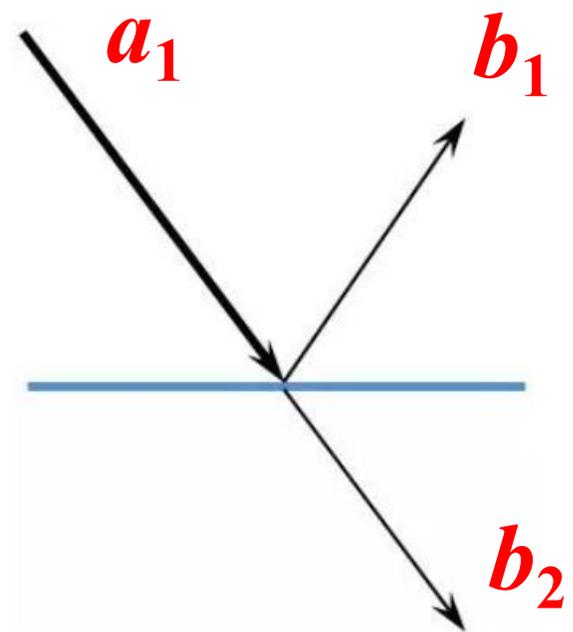
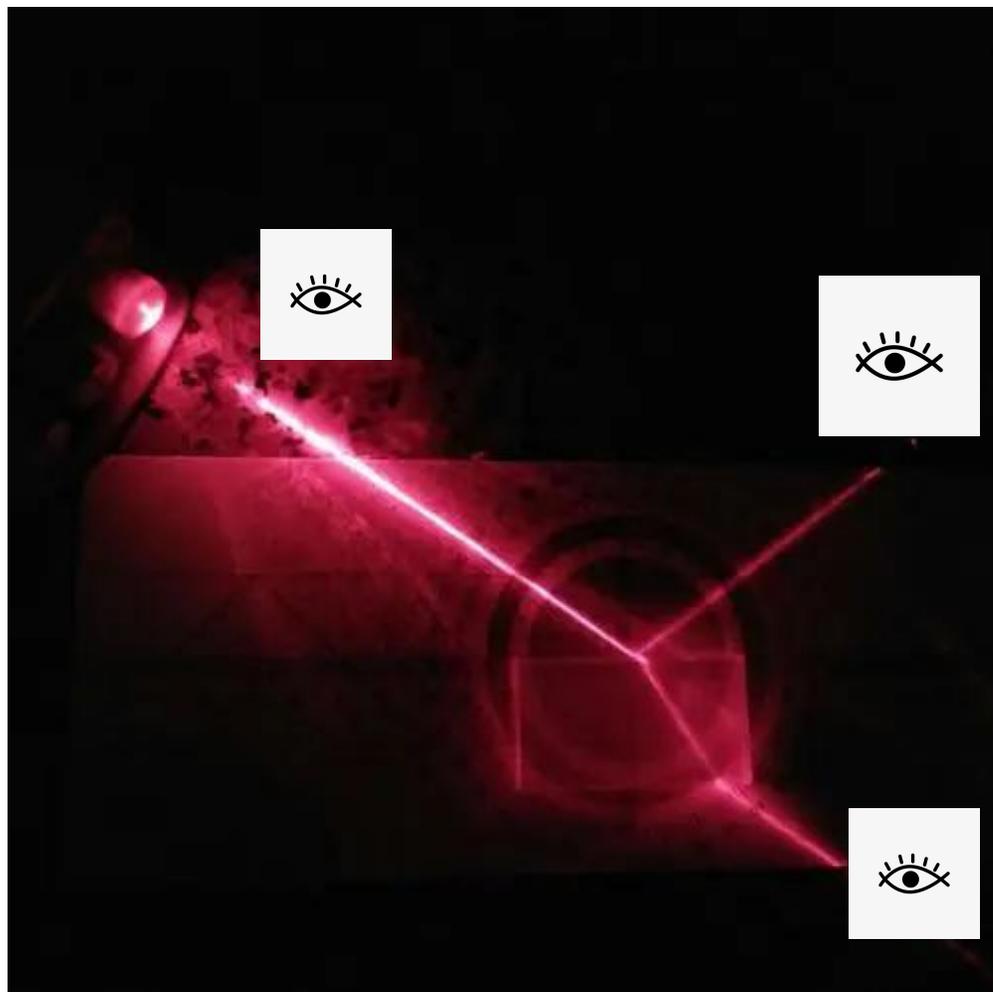
$$B = \frac{T}{2} \left(1 - \frac{ik}{\beta}\right) e^{(ik+\beta)a} \quad |R|^2 = \frac{(k^2 + \beta^2)sh^2 \beta a}{(k^2 + \beta^2)sh^2 \beta a + 4k^2 \beta^2}$$

◆ 势垒贯穿

◆ 隧穿效应



引子：如何测量反射



本章目录

第一节 微波网络与**S**参数

第二节 案例：标量网络分析

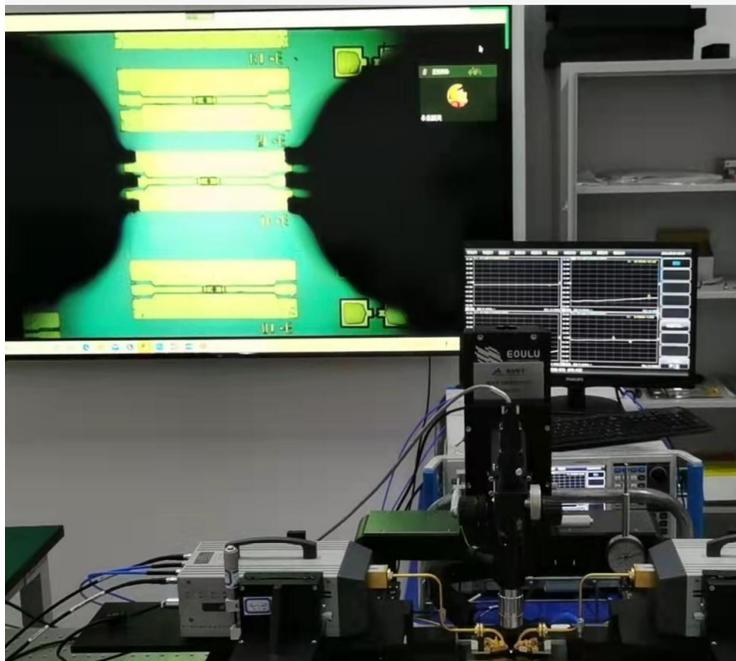
第三节 案例：矢量网络分析

第四节 高低温**S**参数测试原理与方法

正向思维（理论层面）和逆向思维（实验层面）

$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

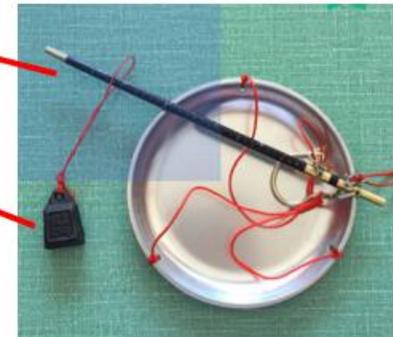
已知负载阻抗，求反射系数



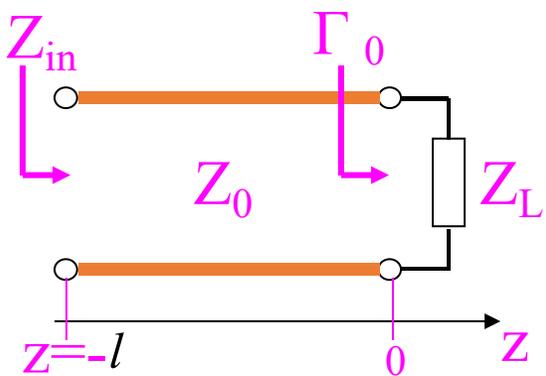
$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$$

已知反射系数，求负载阻抗

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$$



S参数矩阵



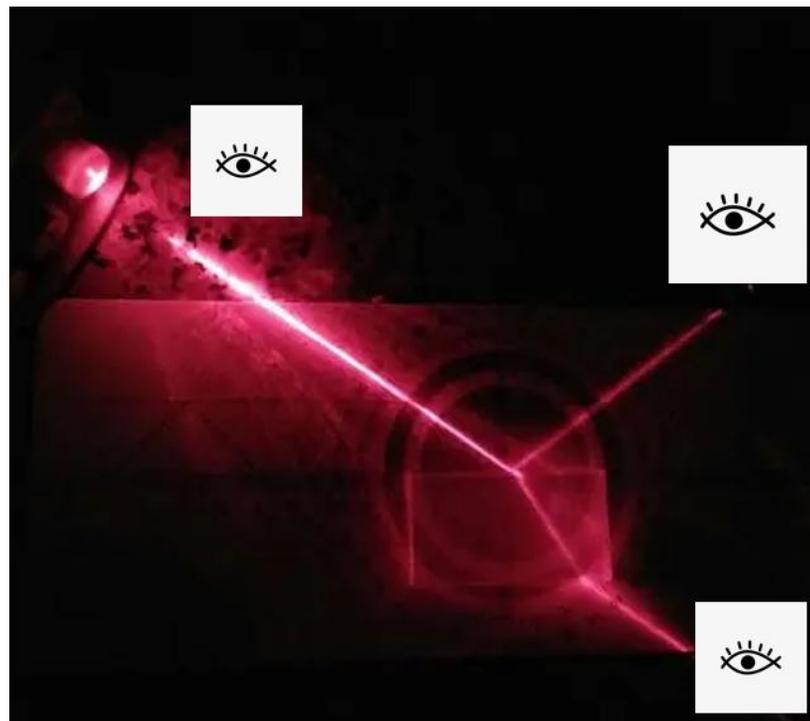
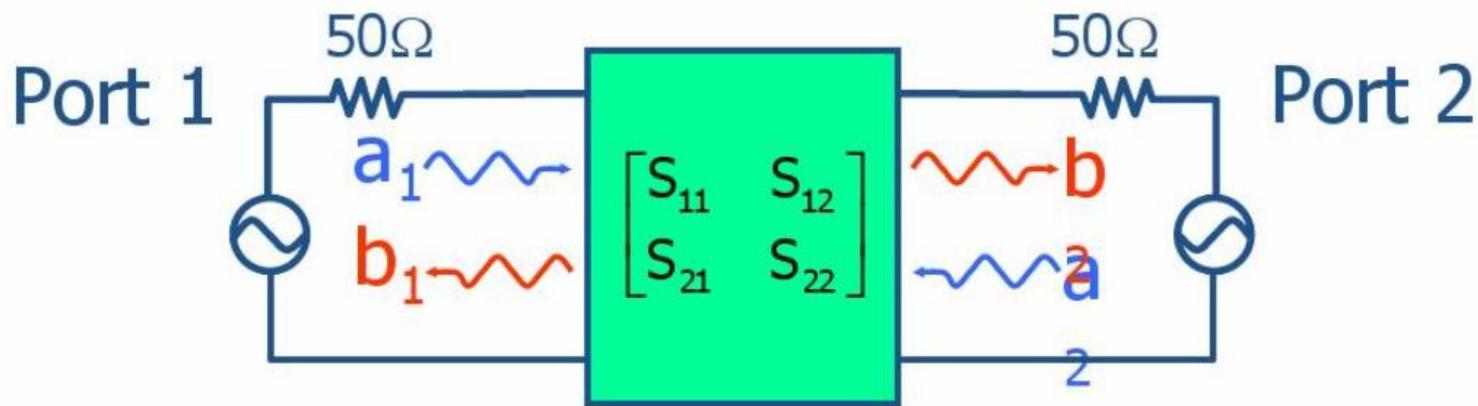
$$\Gamma_0 = \frac{V^-}{V^+}$$

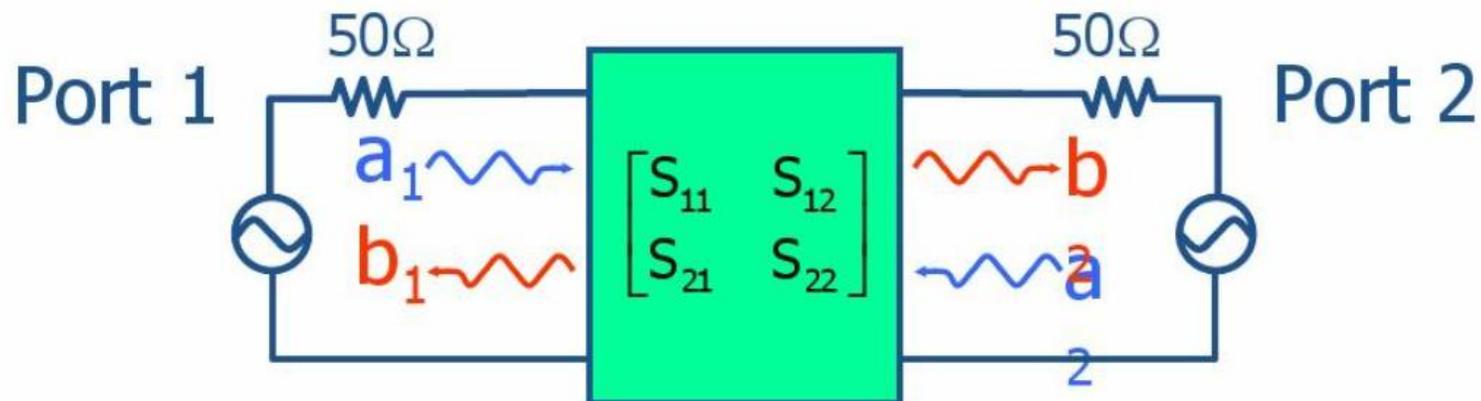
$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

直接测到的是**反射系数**，不是阻抗，也不是I和V
反射系数的**模值是个不变量**





$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}, \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

对一个二端口网络而言，对S参数的测试转换为对 a_1, b_1, a_2, b_2 等参数（功率）的测试

本章目录

第一节 微波网络与**S**参数

第二节 案例：标量网络分析

第三节 案例：矢量网络分析

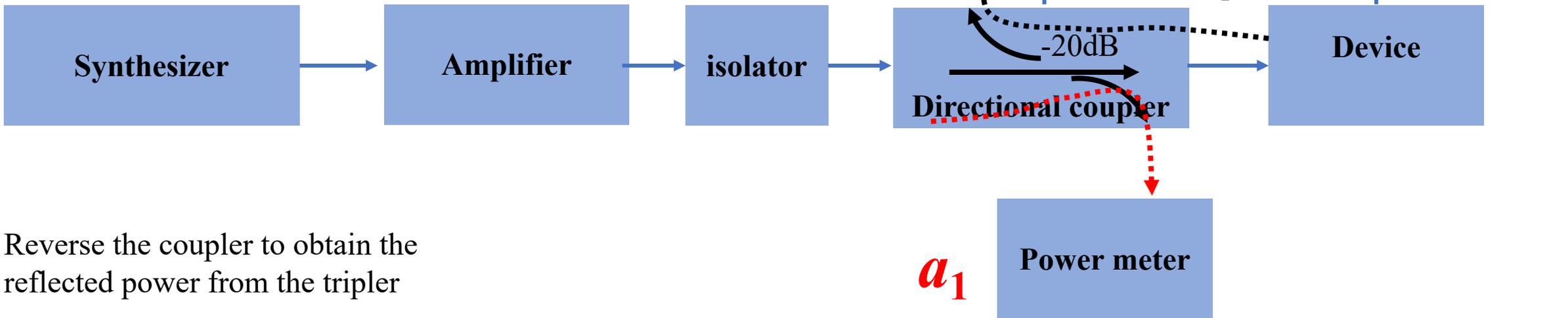
第四节 高低温**S**参数测试方法

标量网络分析与矢量网络分析

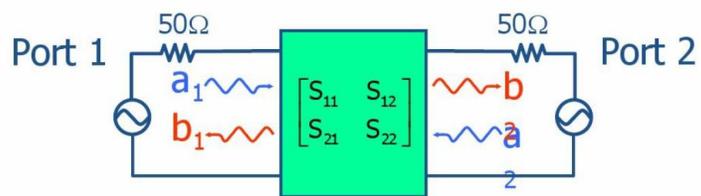
$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}, \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

$$S_{ij} = |S_{ij}| \angle S_{ij} \quad |S_{ij}| = \left| \frac{b_i}{a_j} \right|$$

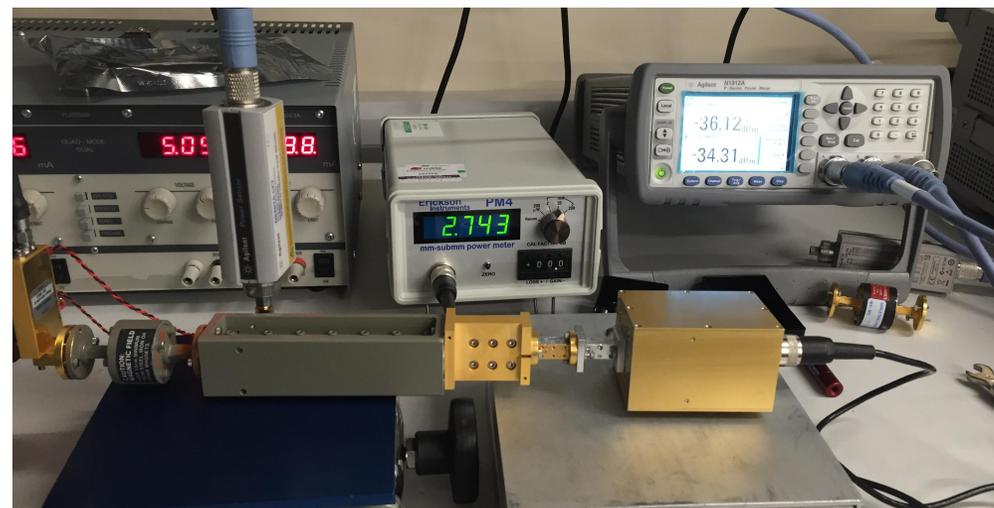
例：标量网络分析

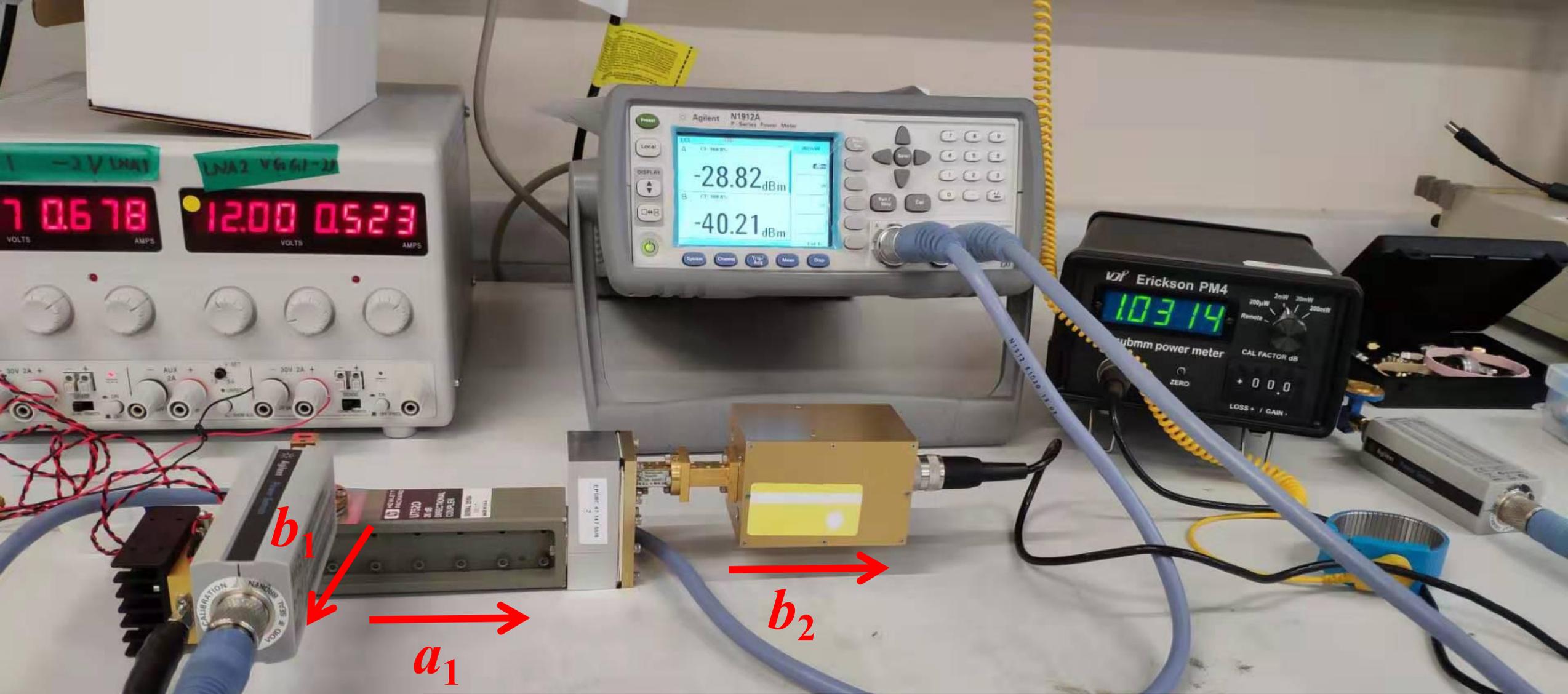


Reverse the coupler to obtain the reflected power from the tripler



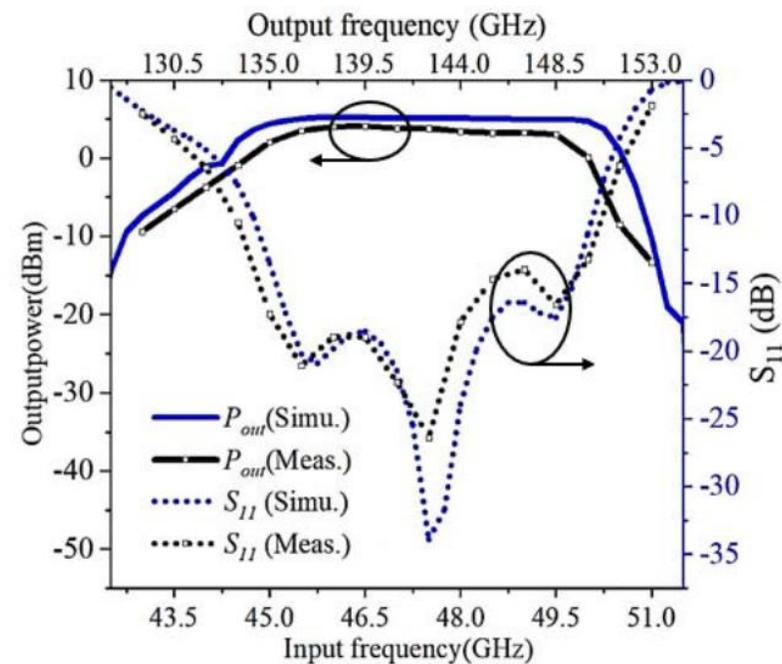
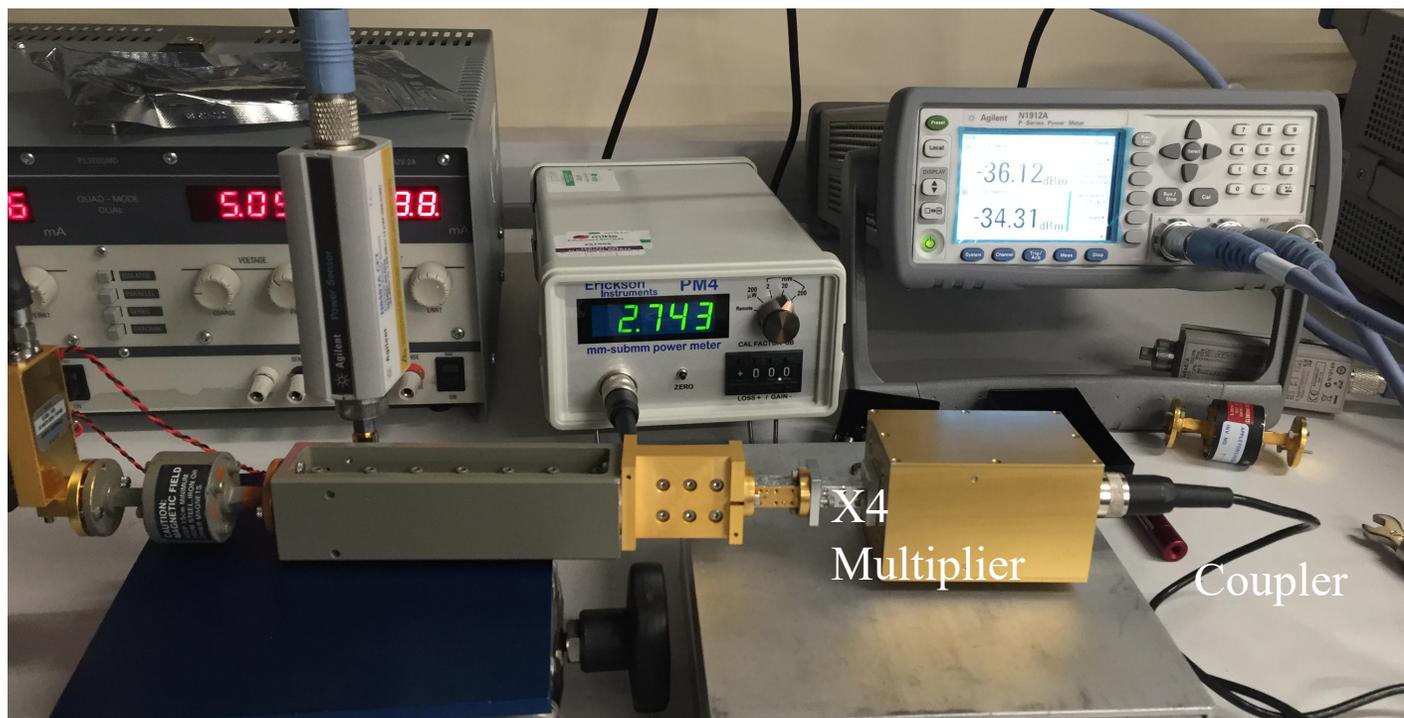
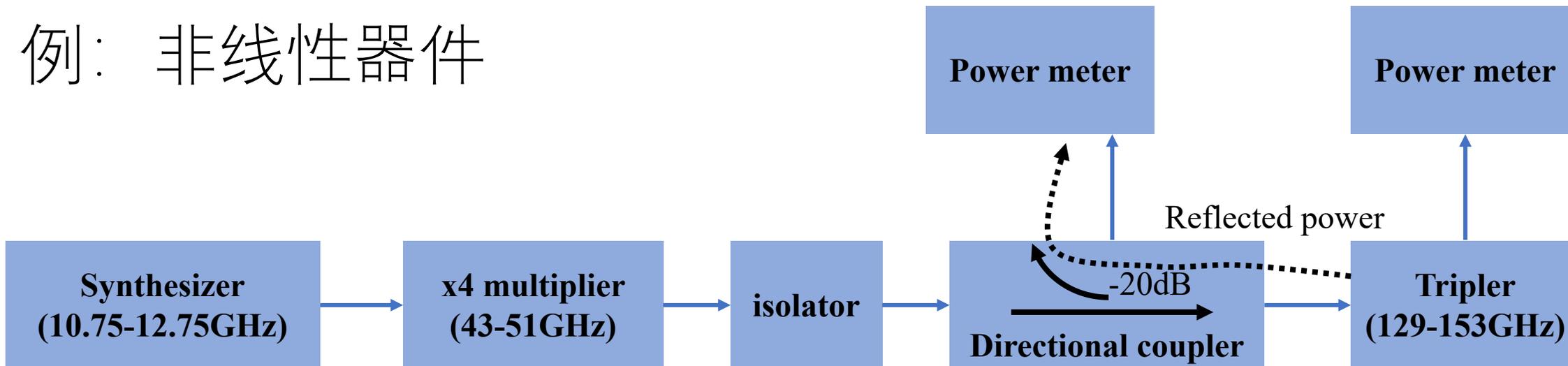
$$|S_{21}| = \left| \frac{b_2}{a_1} \right|$$





$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}, \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

例：非线性器件



该测试方案的优缺点

优点

1. 可以测得**真实输出功率**，
而不是输入功率和输出功率的比值
2. 几乎**不需要校准**
3. 输入输出频率可以不相同
(本质上是功率测量)

缺点

1. 只能得到散射参数的模值

本章目录

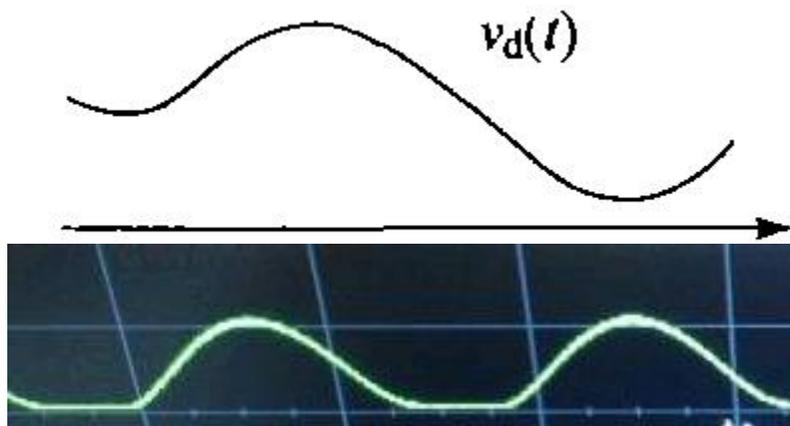
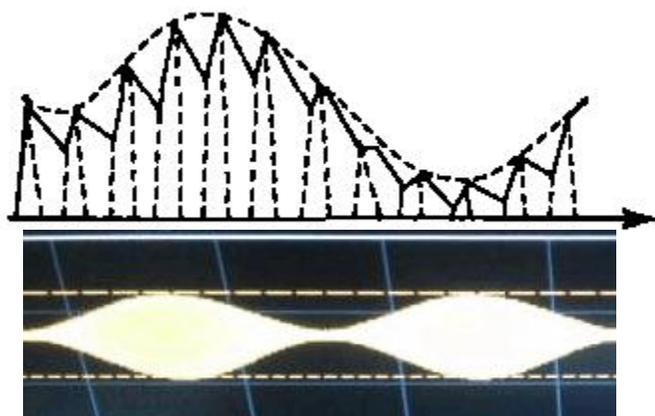
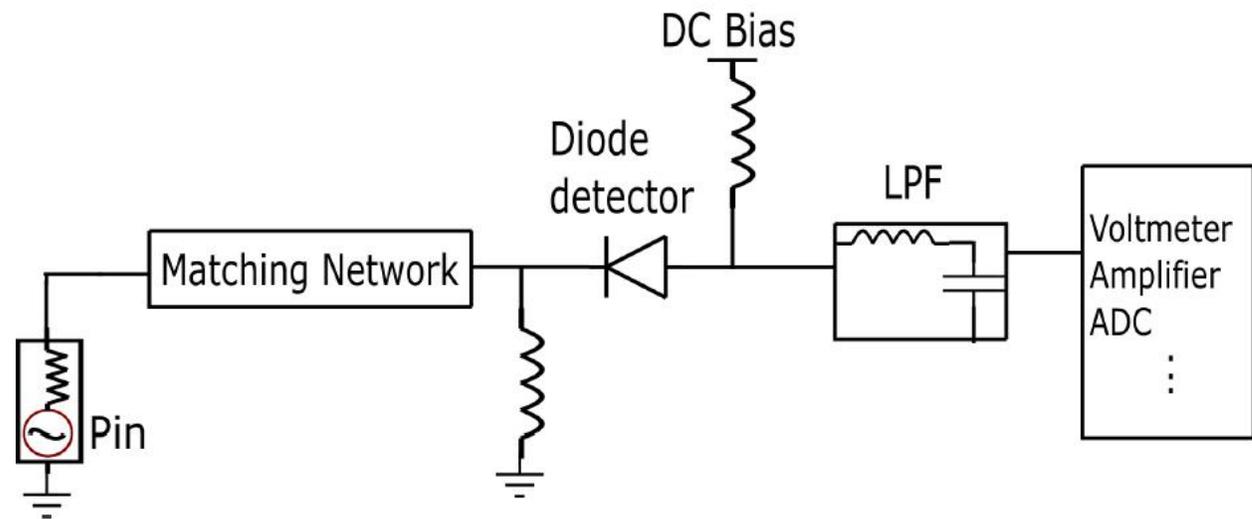
第一节 微波网络与**S**参数

第二节 案例：标量网络分析

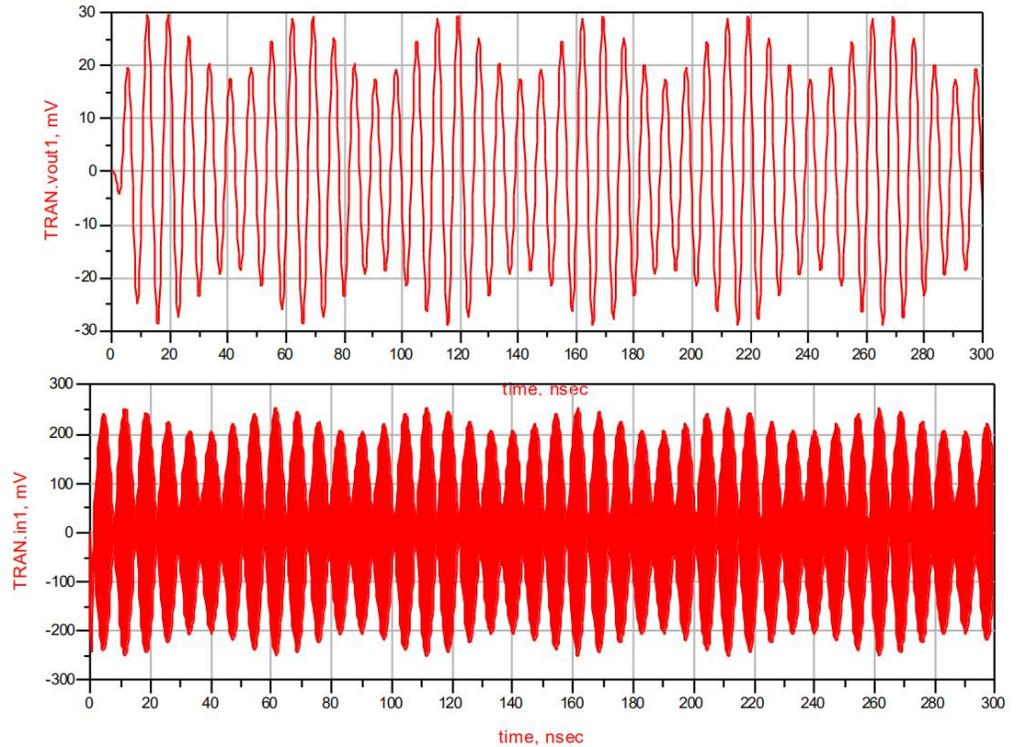
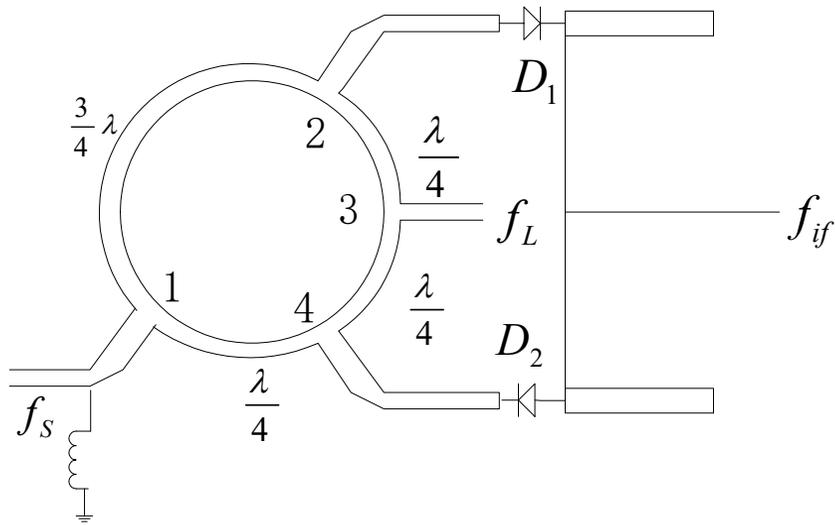
第三节 案例：矢量网络分析和滤波器测试

第四节 高低温**S**参数测试方法

矢量网络分析：检波与混频 (1)

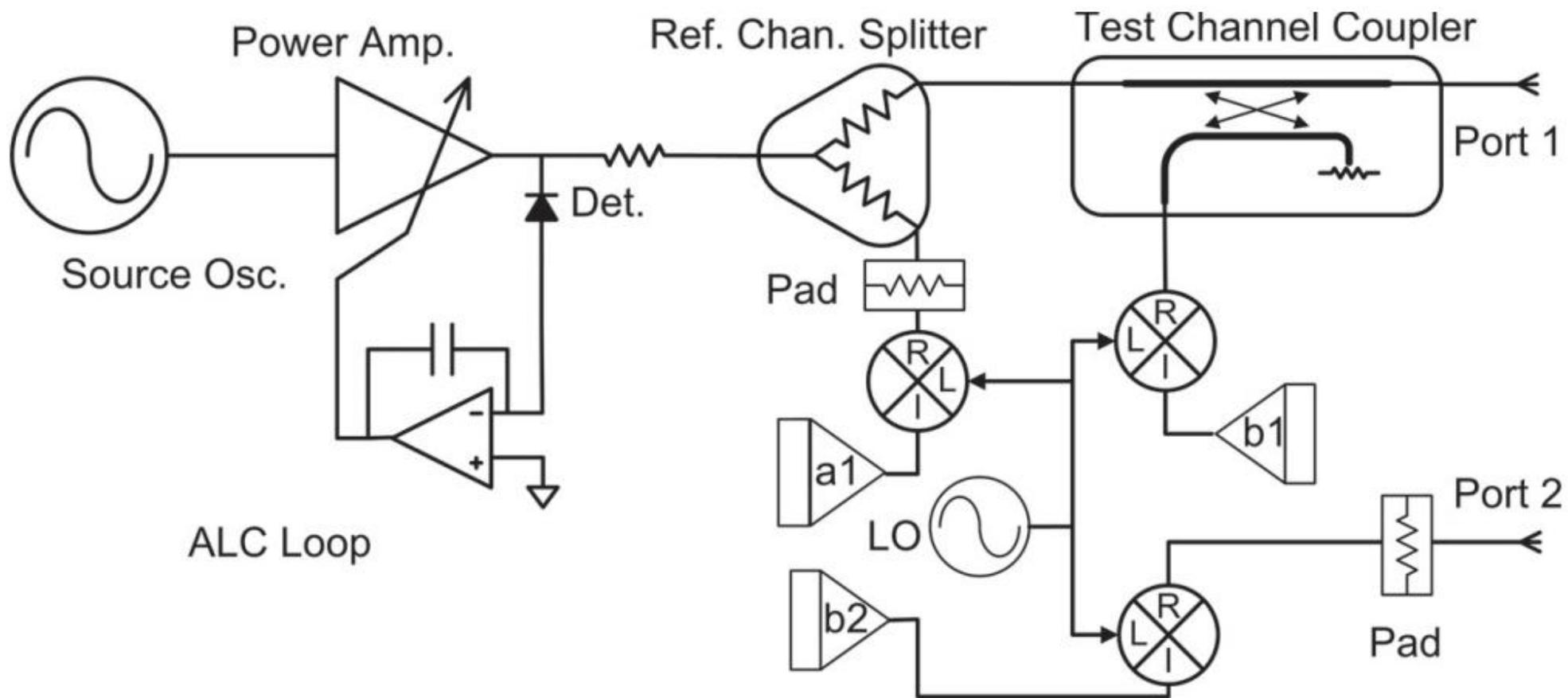


矢量网络分析：检波与混频 (2)

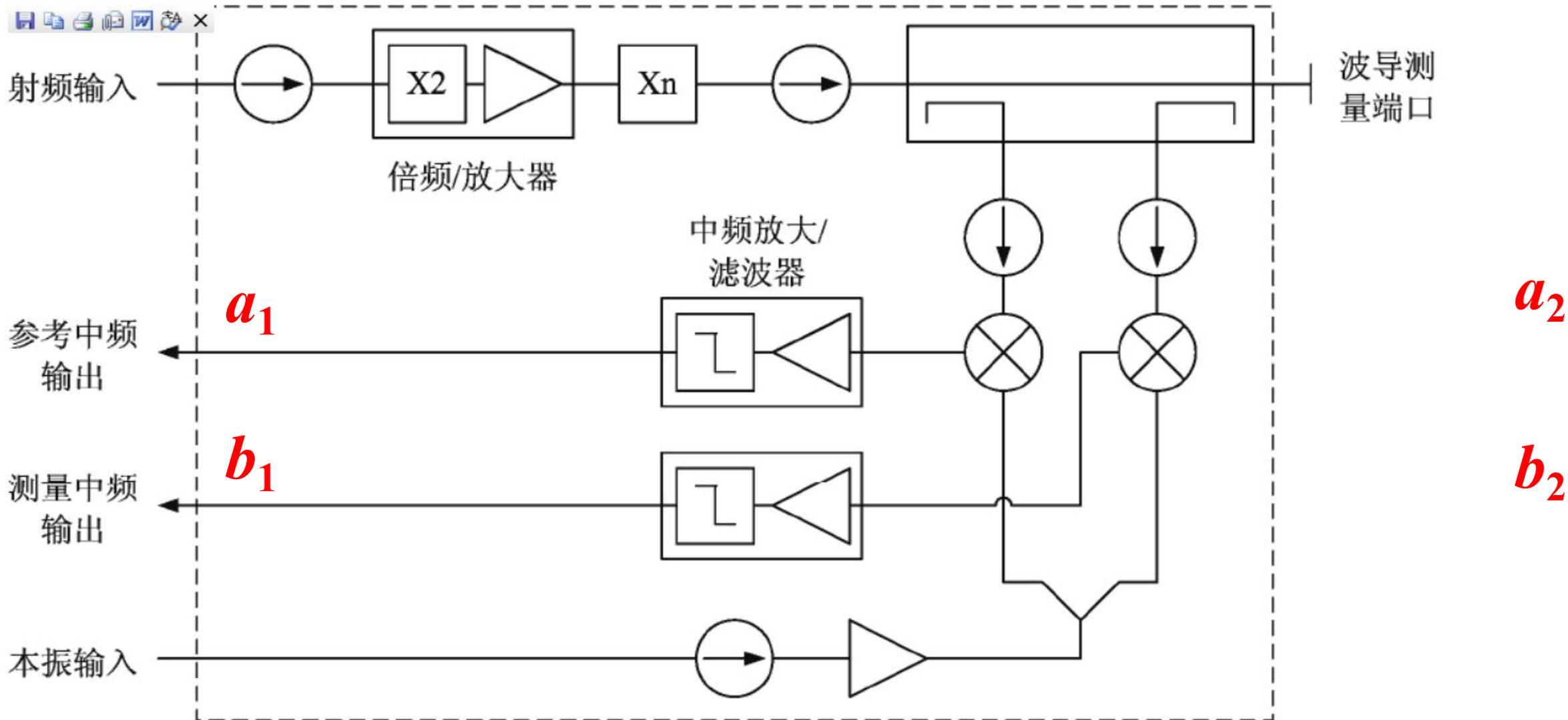


与检波（或功率计）不同，混频能够保留信号的相位信息

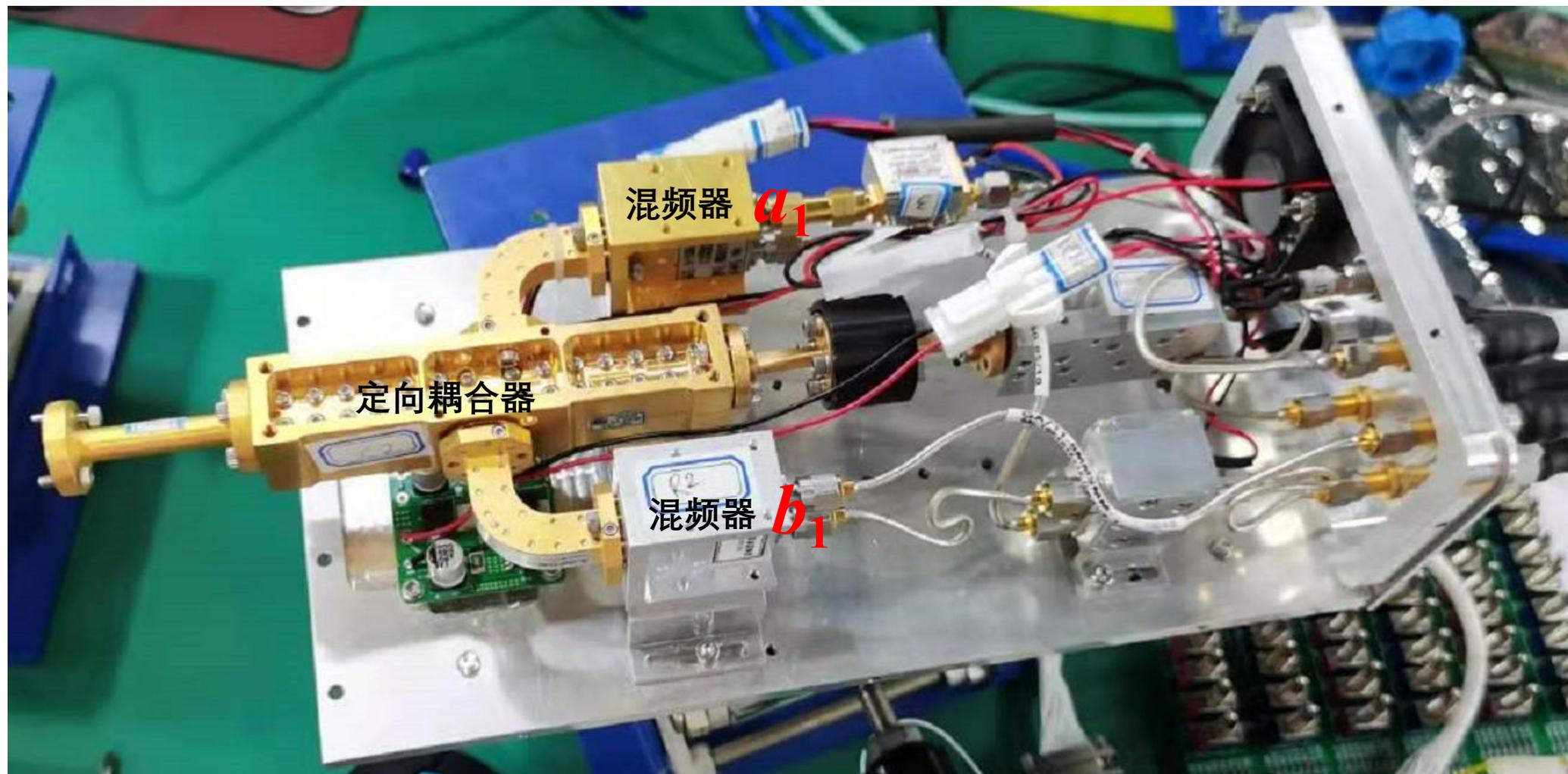
简易矢量网络分析系统框图



高频矢量网络分析系统框图

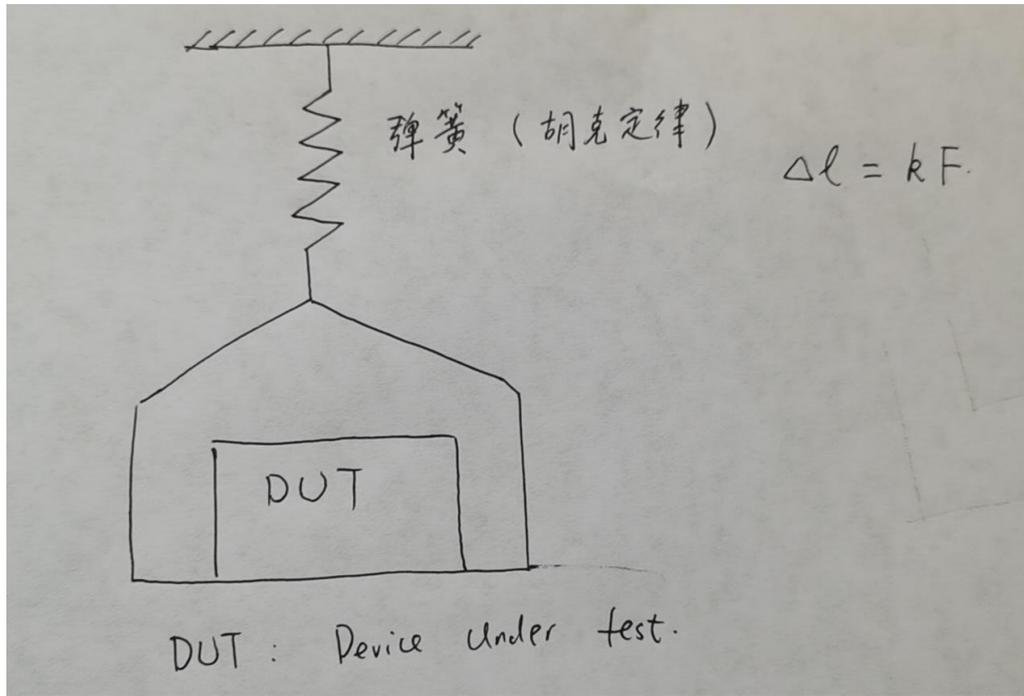


例：高频矢量网络分析系统实物

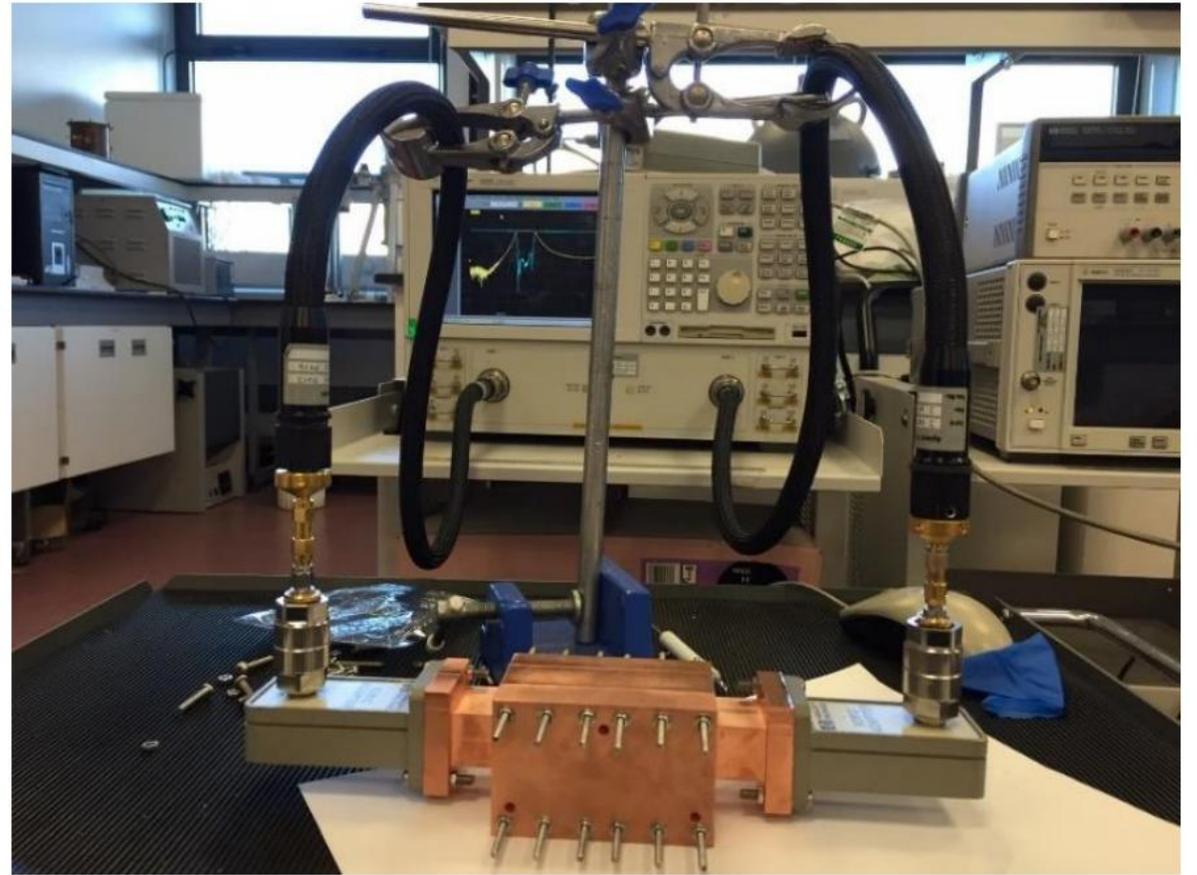


1. 可以得到散射参数的模值和相位
2. 无法测量绝对功率

S参数测试中的校准和去嵌入

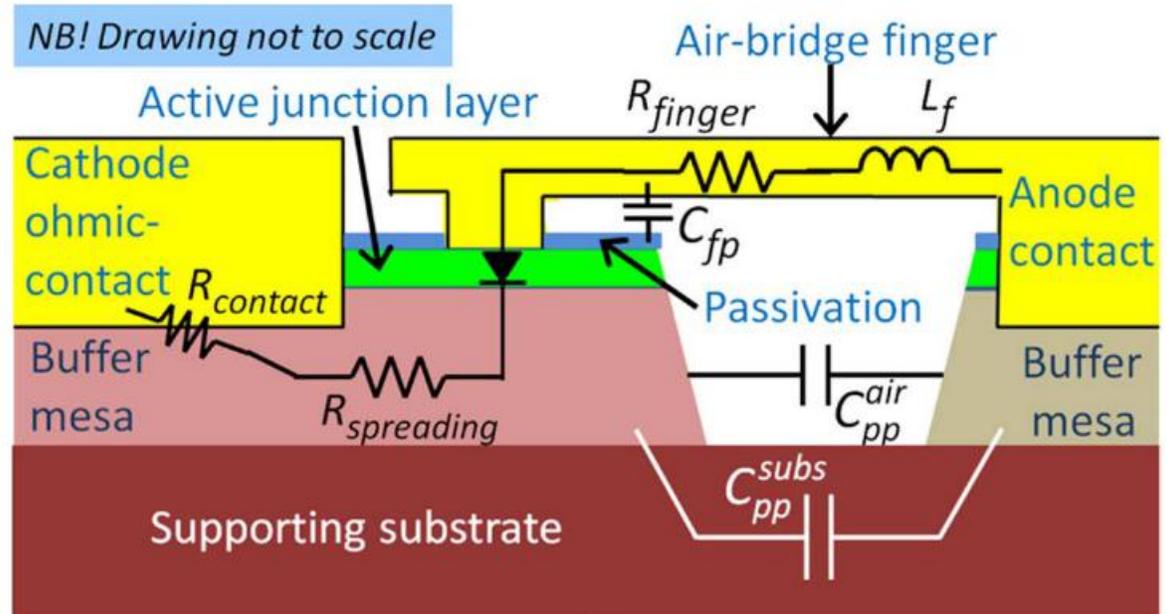
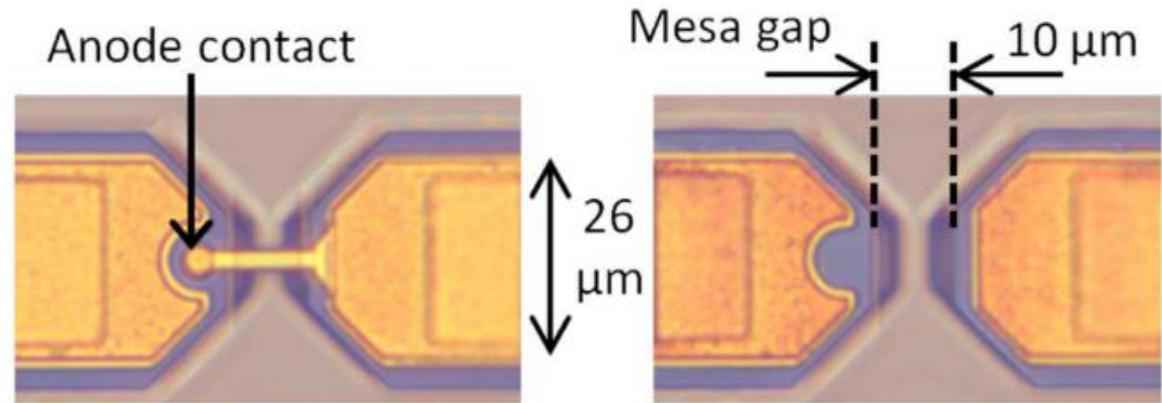
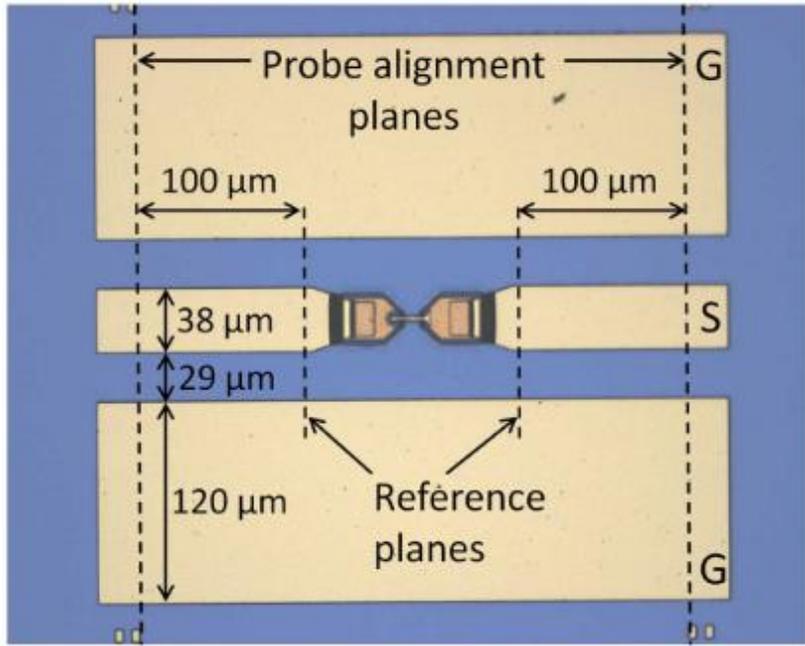


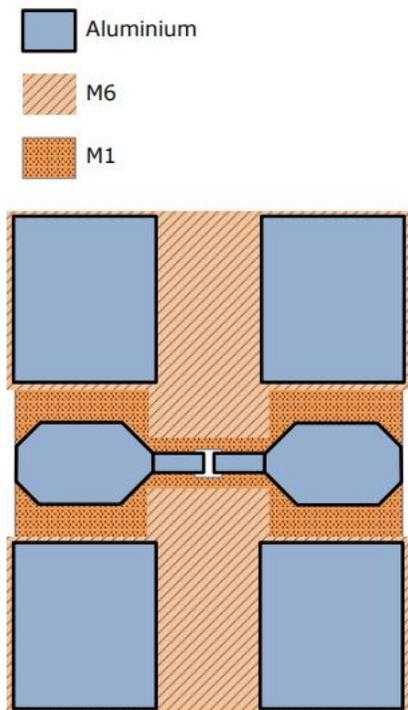
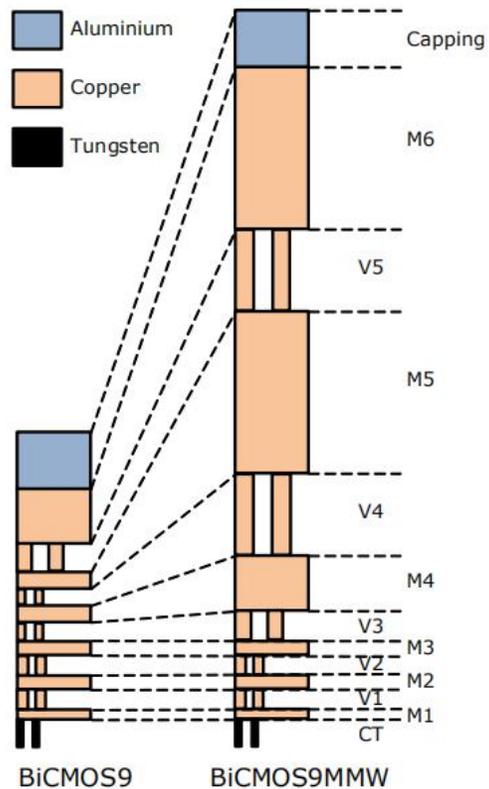
移除盘子的重量



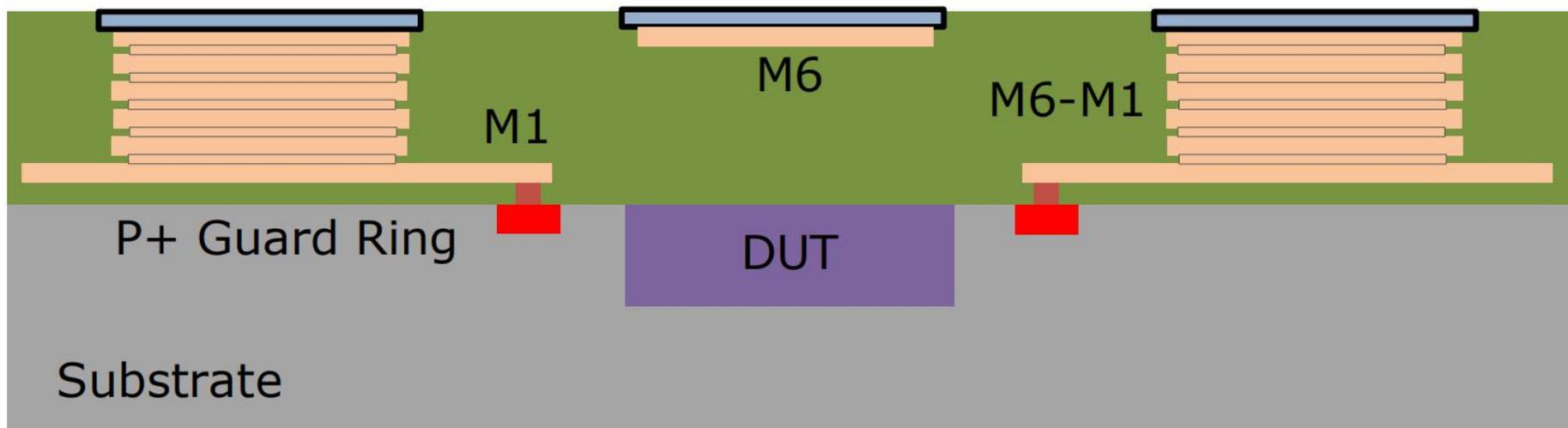
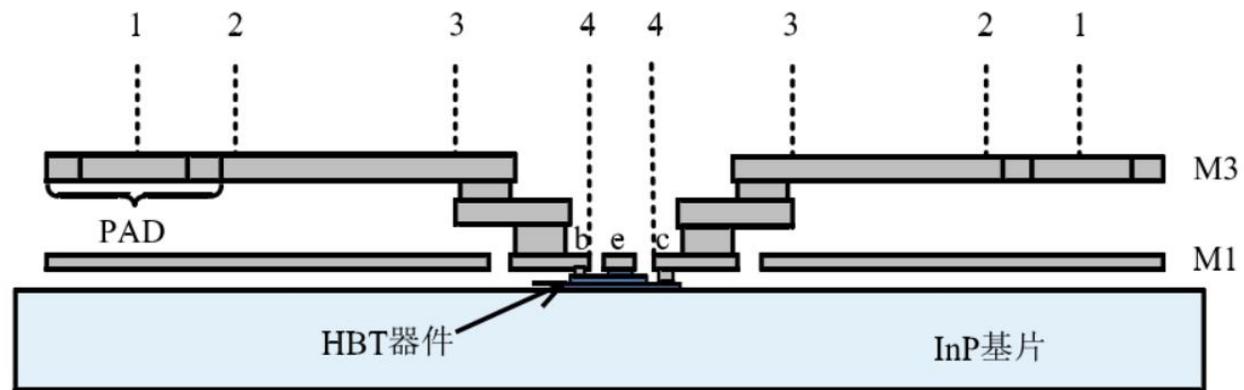
移除线缆的影响

移除多余传输线/结构的影响

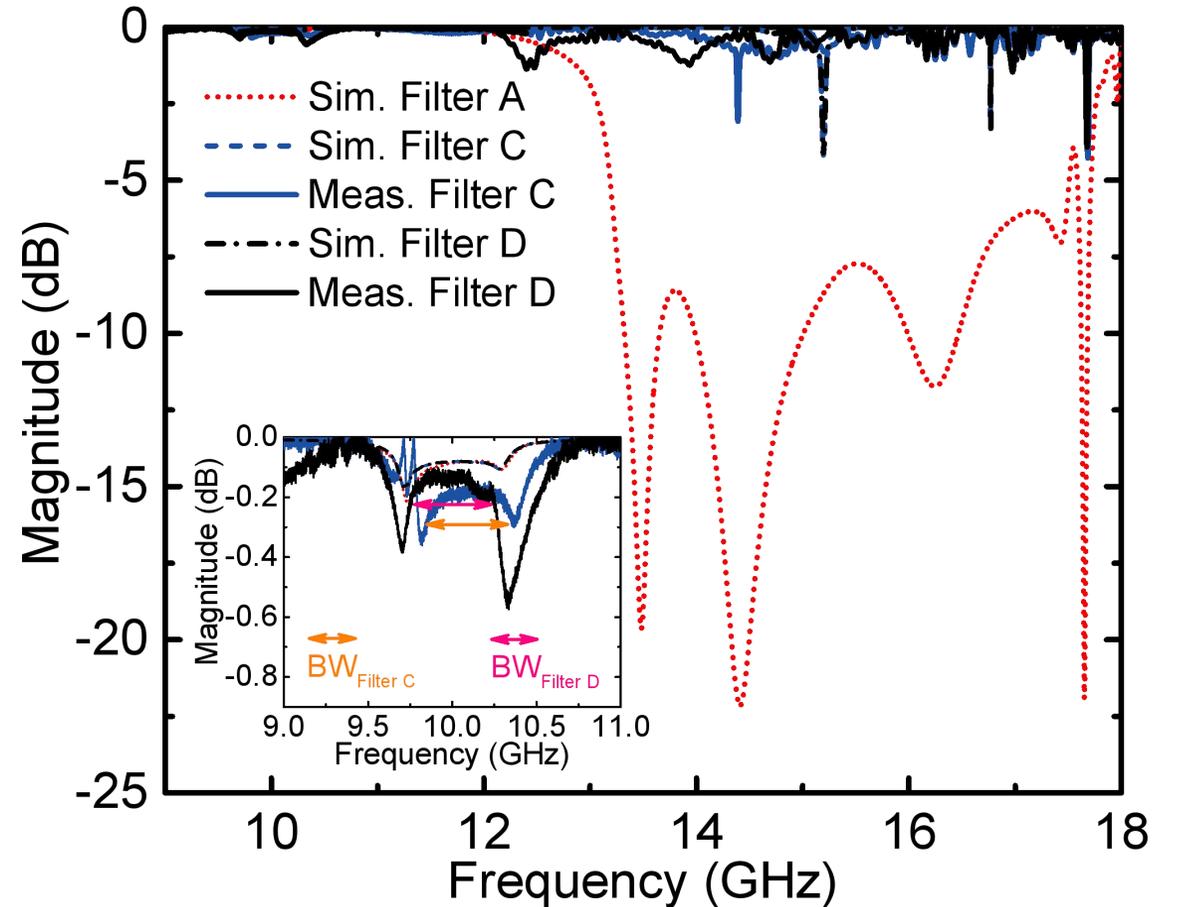
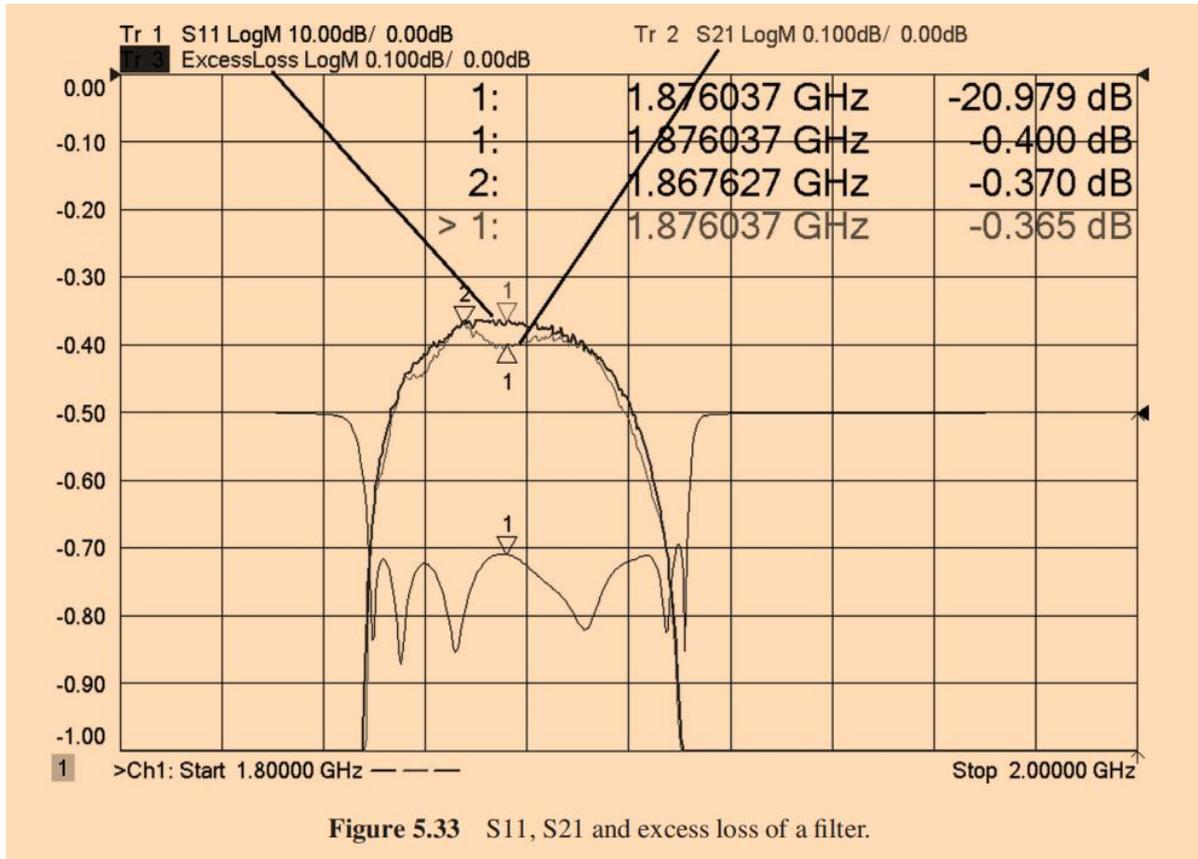




案例：芯片测试和参数提取



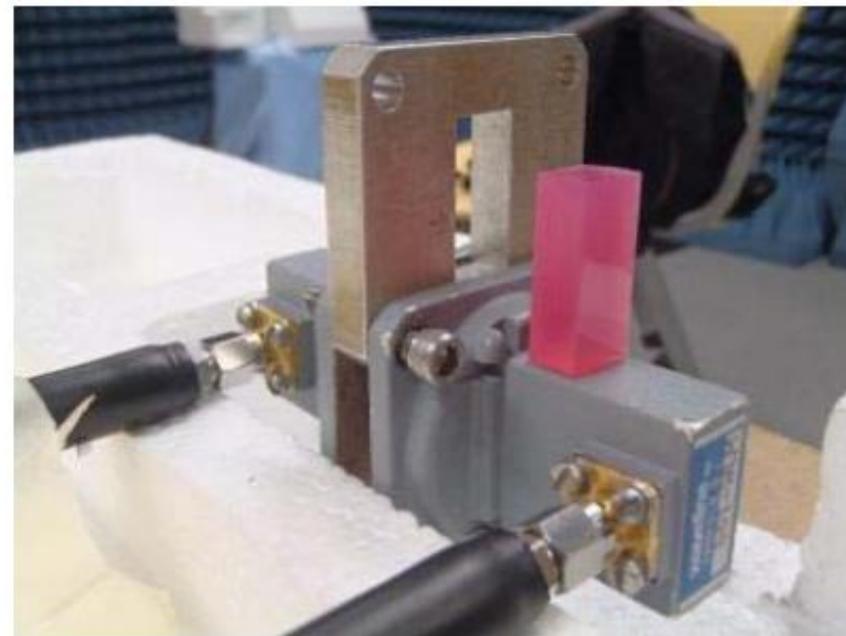
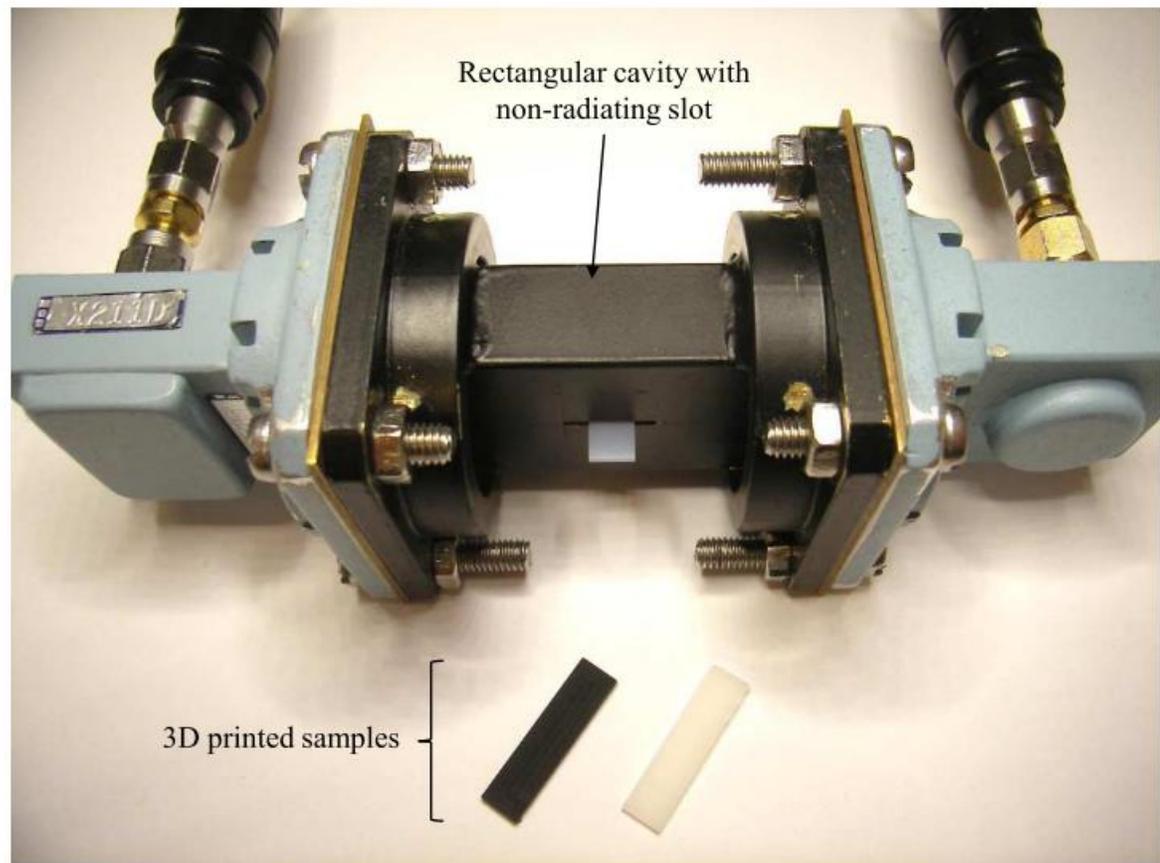
案例：滤波器测试



案例：非对称S11/S22

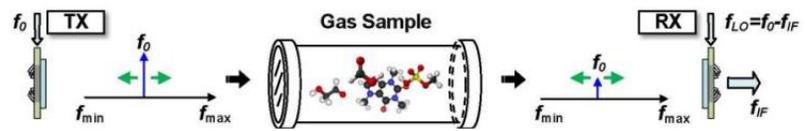
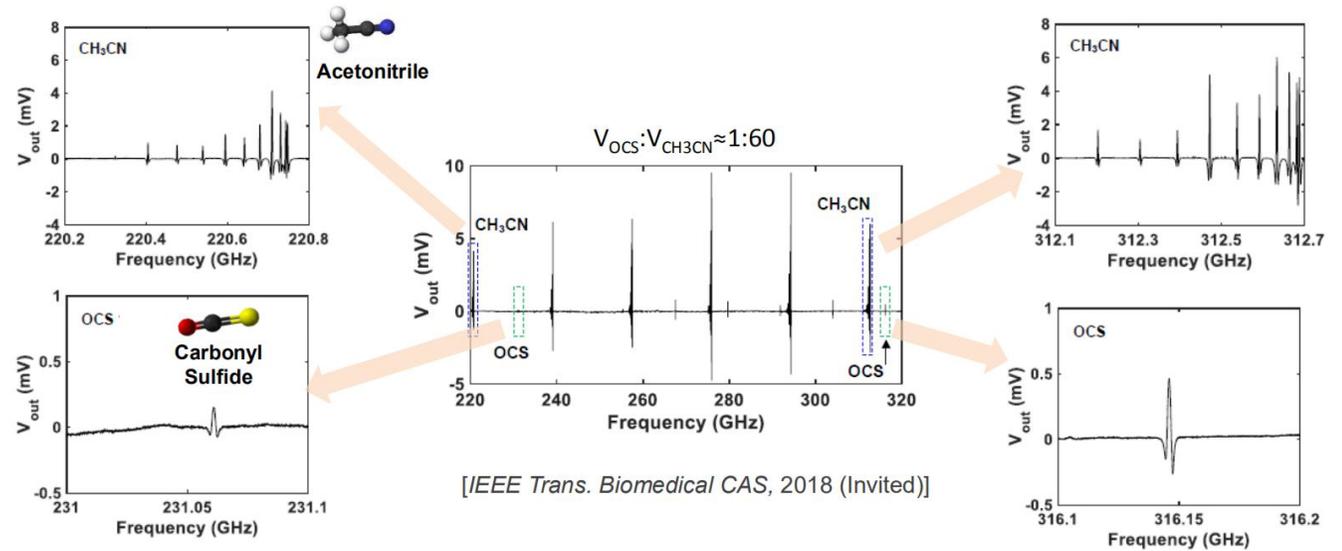


案例：材料测试

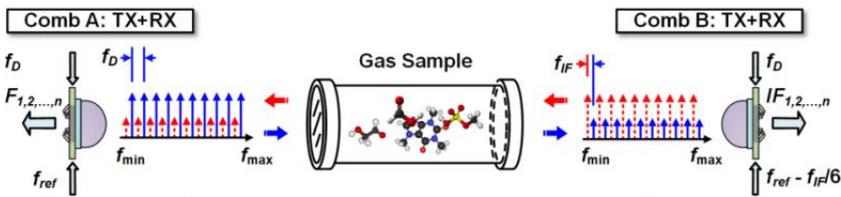
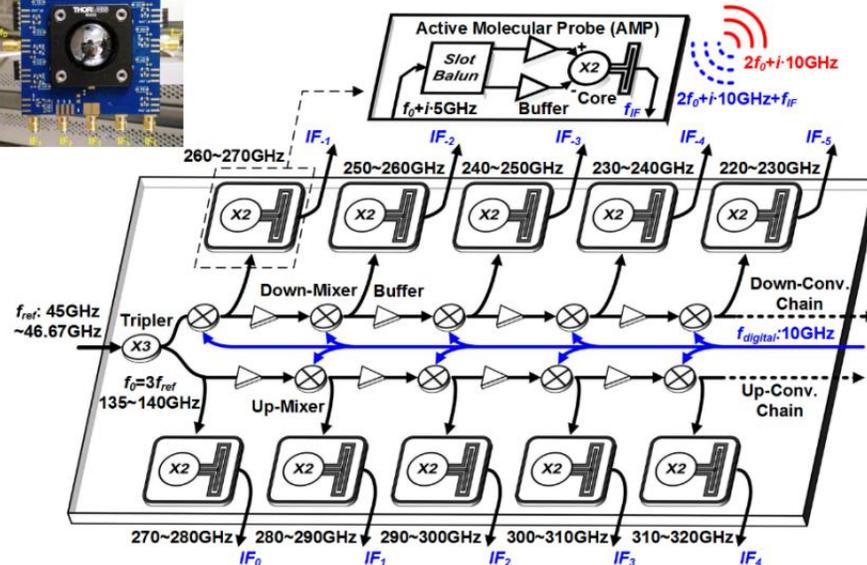


思考：材料测试的标准应该溯源至哪些基本单位？

案例：分子、细胞和毒品探测 (1)



Conventional Scheme

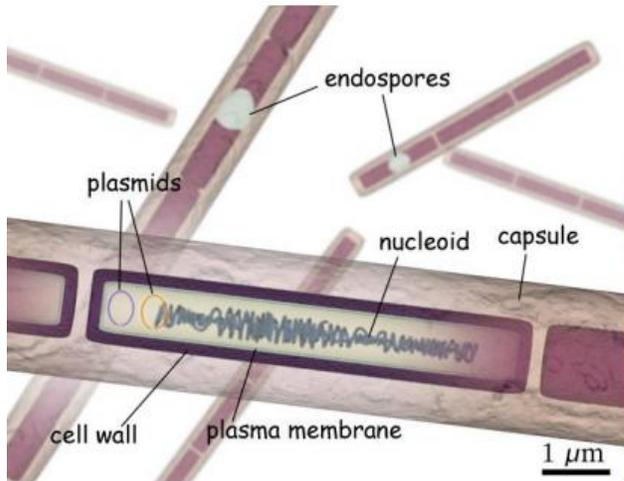


↑ Spectrum of Comb A ↑ Spectrum of Comb B

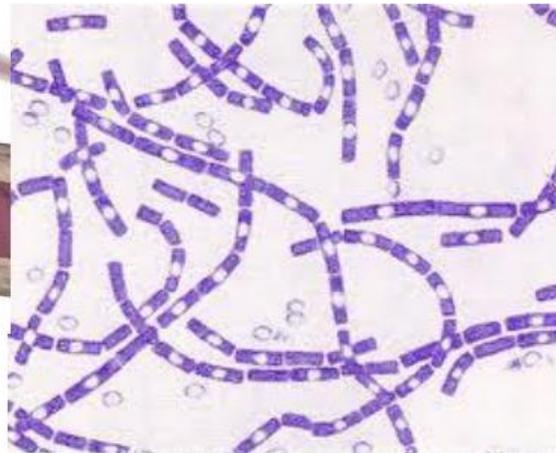
Bilateral-Dual-Comb Scheme

案例：分子、细胞和毒品探测 (2)

Motivation: Bacillus anthracis (Anthrax)



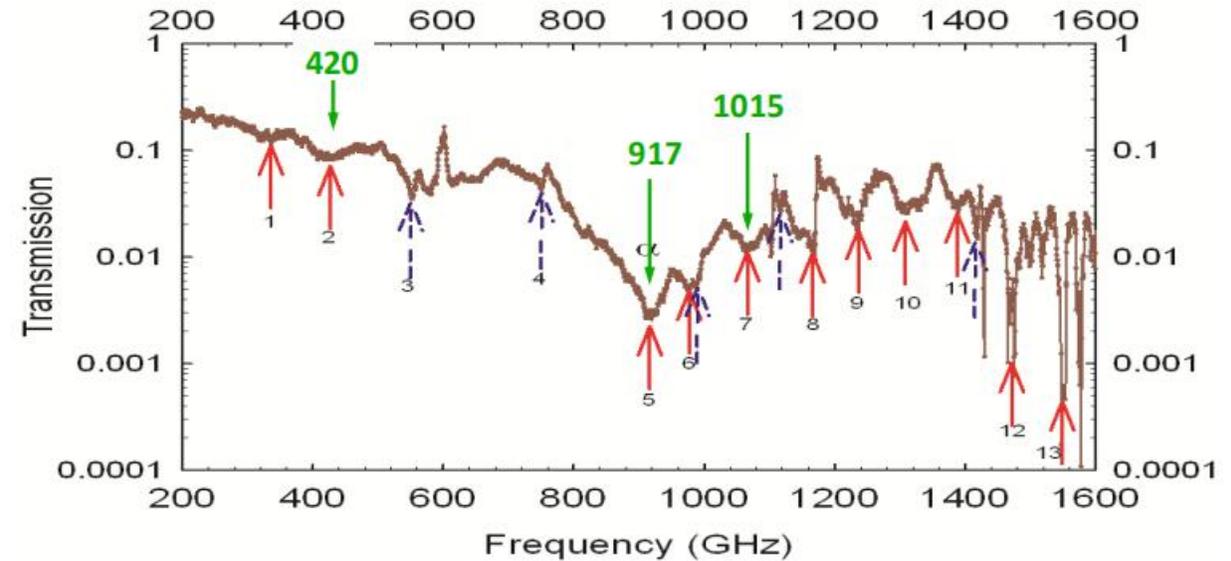
Macromolecular Structure



Microphotograph

THz Transmission Through Bt (cont)

"Moist" Sample (after ~1 hr drying)

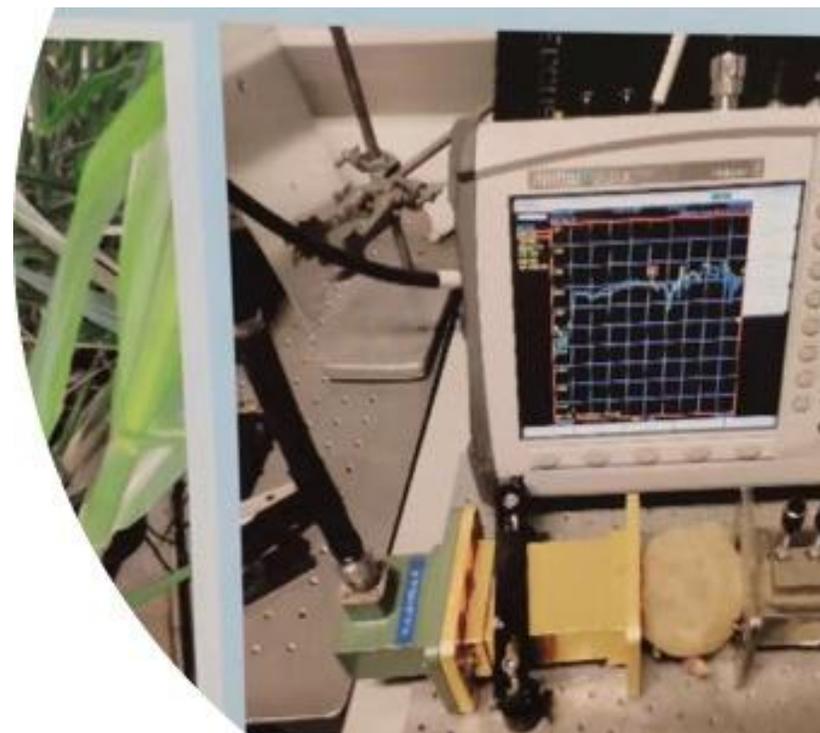
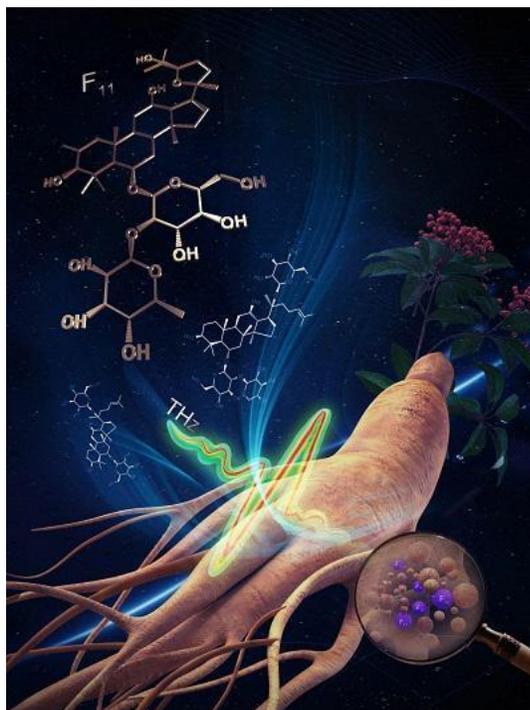
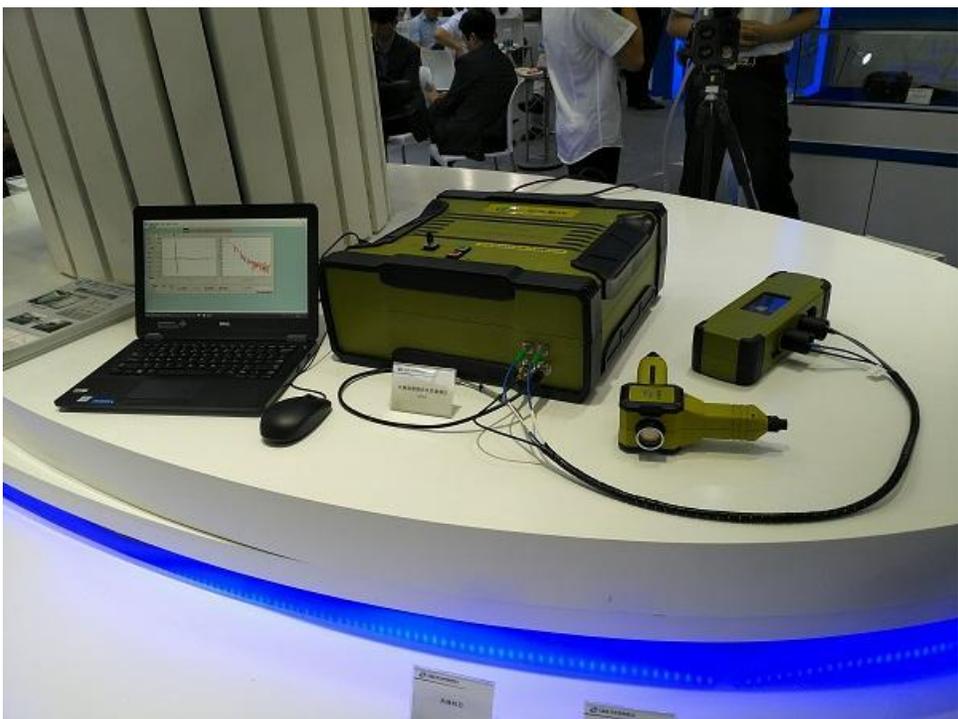


Key Point: With drying, the predominant signature at 910 shifts up to 917 GHz, but the secondary signature at 1050 shifts down to 1015 GHz.

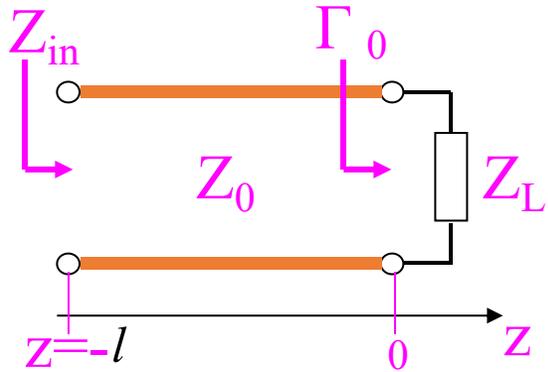
案例：中草药，粮食作物和地沟油

中国工程院院士庄松林领衔的太赫兹科研团队，将太赫兹技术在全国首次应用于人参皂苷的精准定性与定量检测，并可有效识别西洋参的不同产地。

此外，太赫兹技术还可促使“地沟油”查出率进一步提高。团队成员朱亦鸣教授介绍：“地沟油多次使用后会含有动物脂肪酸、过氧化物等物质，新鲜的油主要是植物脂肪酸，两者振动频率不同，只需要把每次检测出的油品的共振吸收峰和数据库对比，就能有效地判断出油脂内含有哪一种成分，从而判断出油的种类。

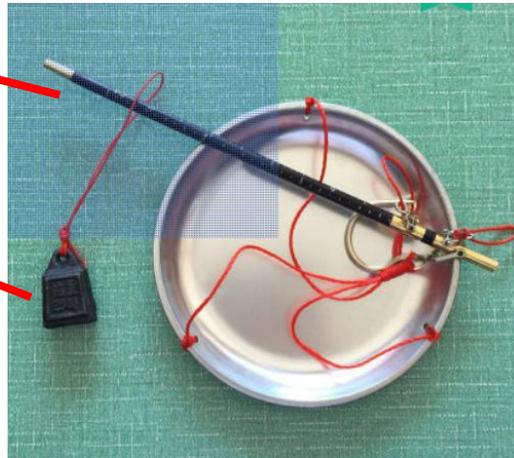


回顾：射频阻抗与反射系数

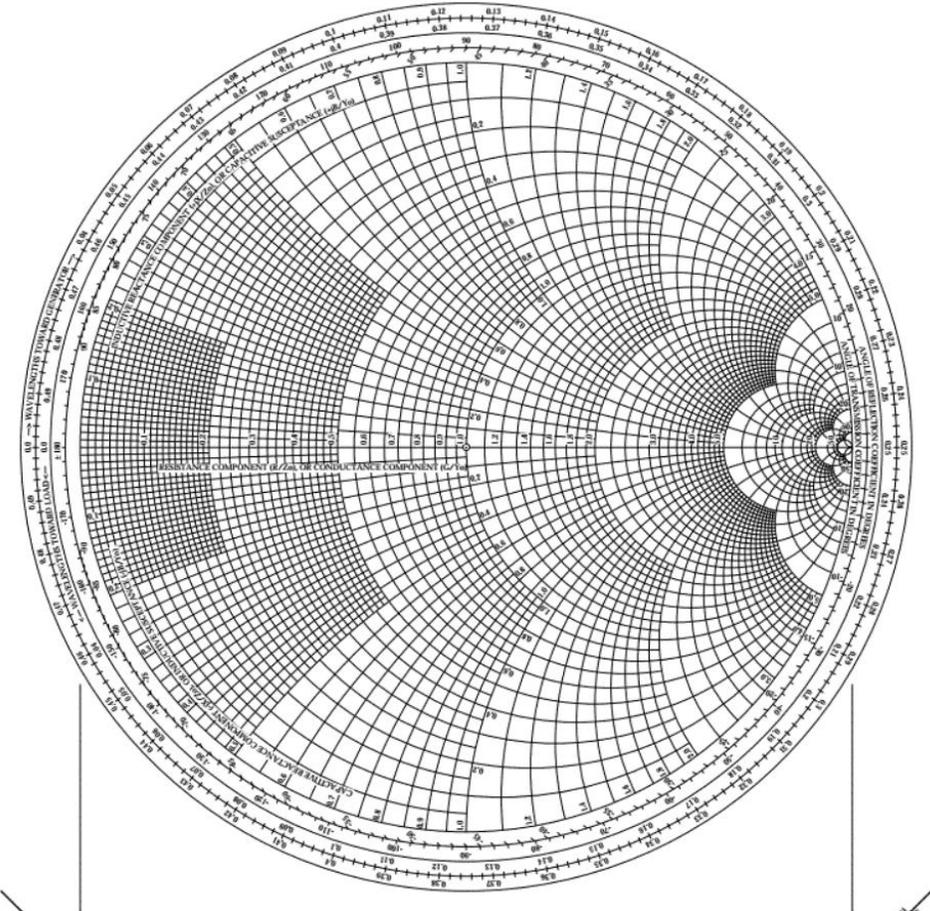


$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad \Gamma_0 = \frac{V^-}{V^+}$$

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$$

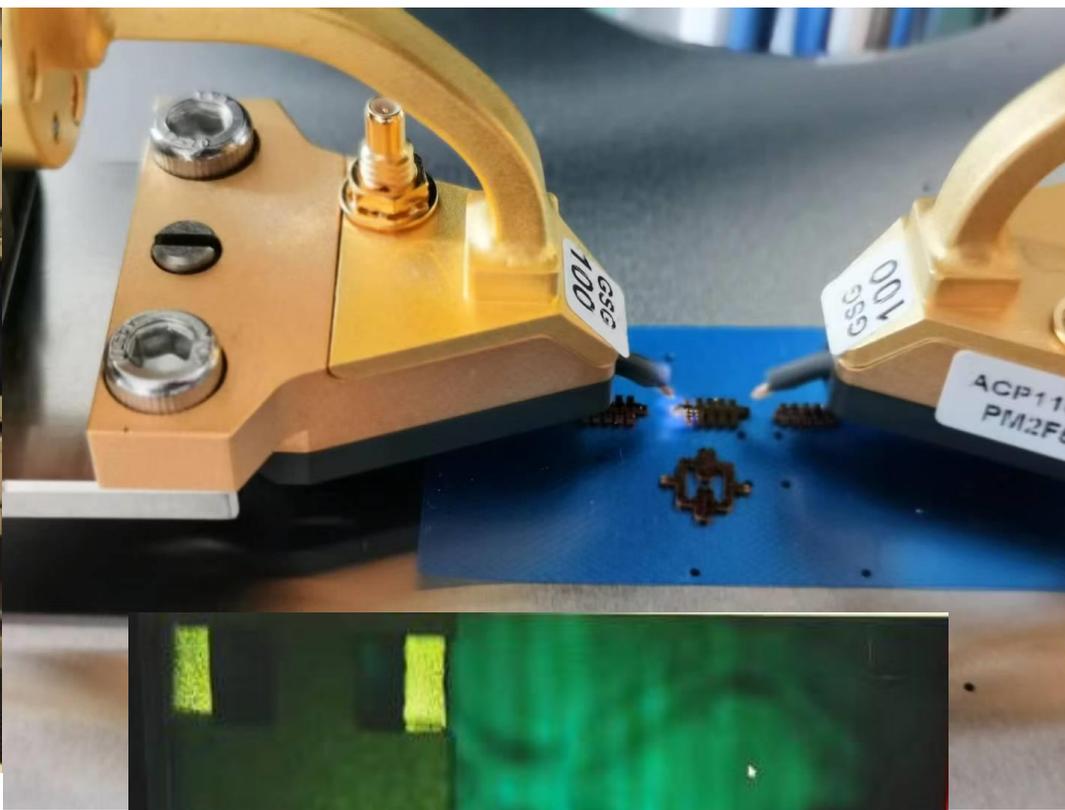
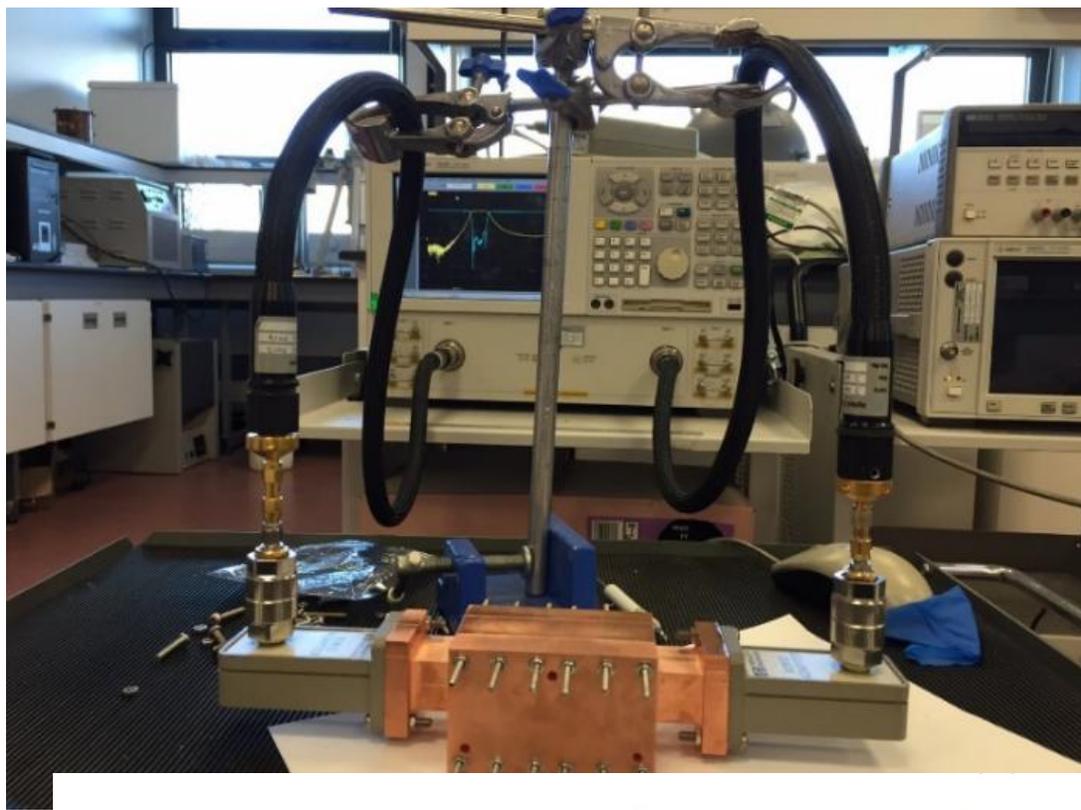


The Complete Smith Chart
Black Magic Design

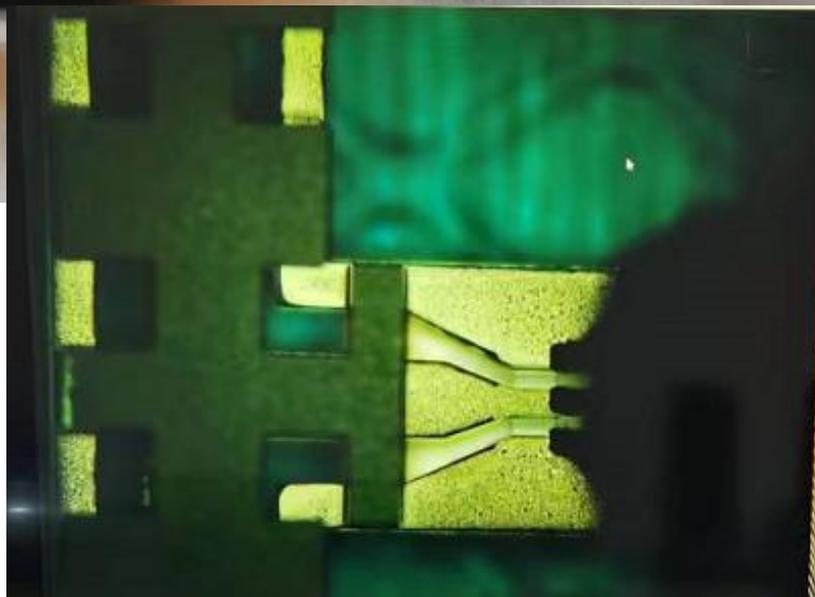
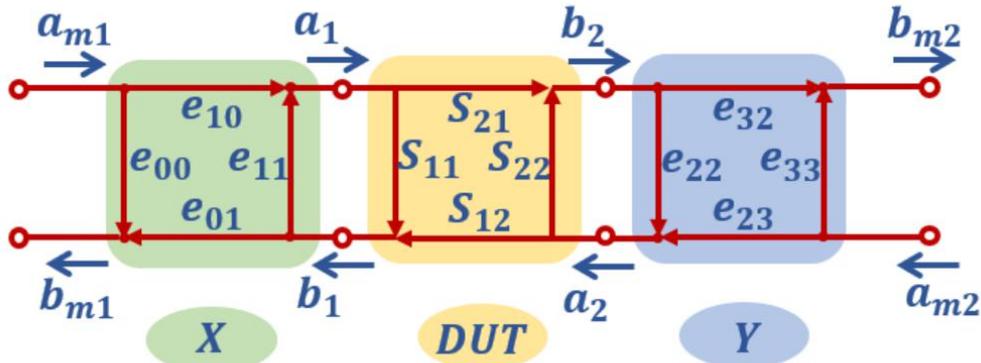


$L \rightarrow S \rightarrow Z$, 淘精且准

去嵌测试，水好论文



去皮称重，算精品价



小结

- 1. 对于低频电路而言，电压和电流是能够直接被测到的参数，因此通常采用Z矩阵或者Y矩阵定义一个网络。
- 2. 对于高频电路而言，入射波和反射波是能够被直接测量的参数，因此通常采用S参数矩阵定义一个网络。
- 3. 对一个二端口网络而言，对S参数的测试转换为对 a_1, b_1, a_2, b_2 等参数的测试
- 4. S参数是一个复数，包含模值和相位
- 5. S参数测试不仅限于微波器件，还可以用来测药品，毒品，中草药，地沟油等等。
- 6. 射频阻抗实质上是通过S参数和阻抗标准计算得到的。

本章目录

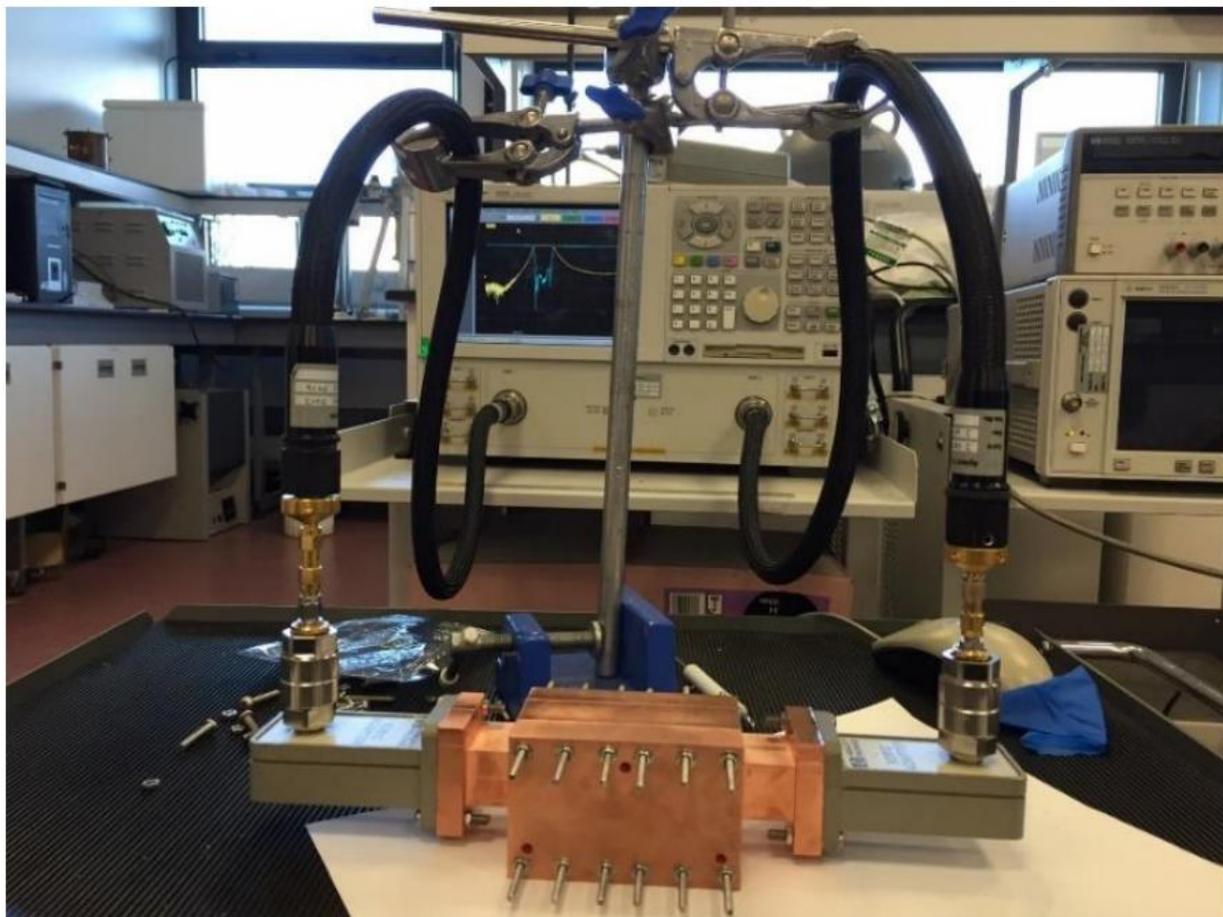
第一节 微波网络与**S**参数

第二节 案例：标量网络分析

第三节 案例：矢量网络分析和滤波器测试

第四节 高低温**S**参数测试方法

高温/低温测试中遇到的问题



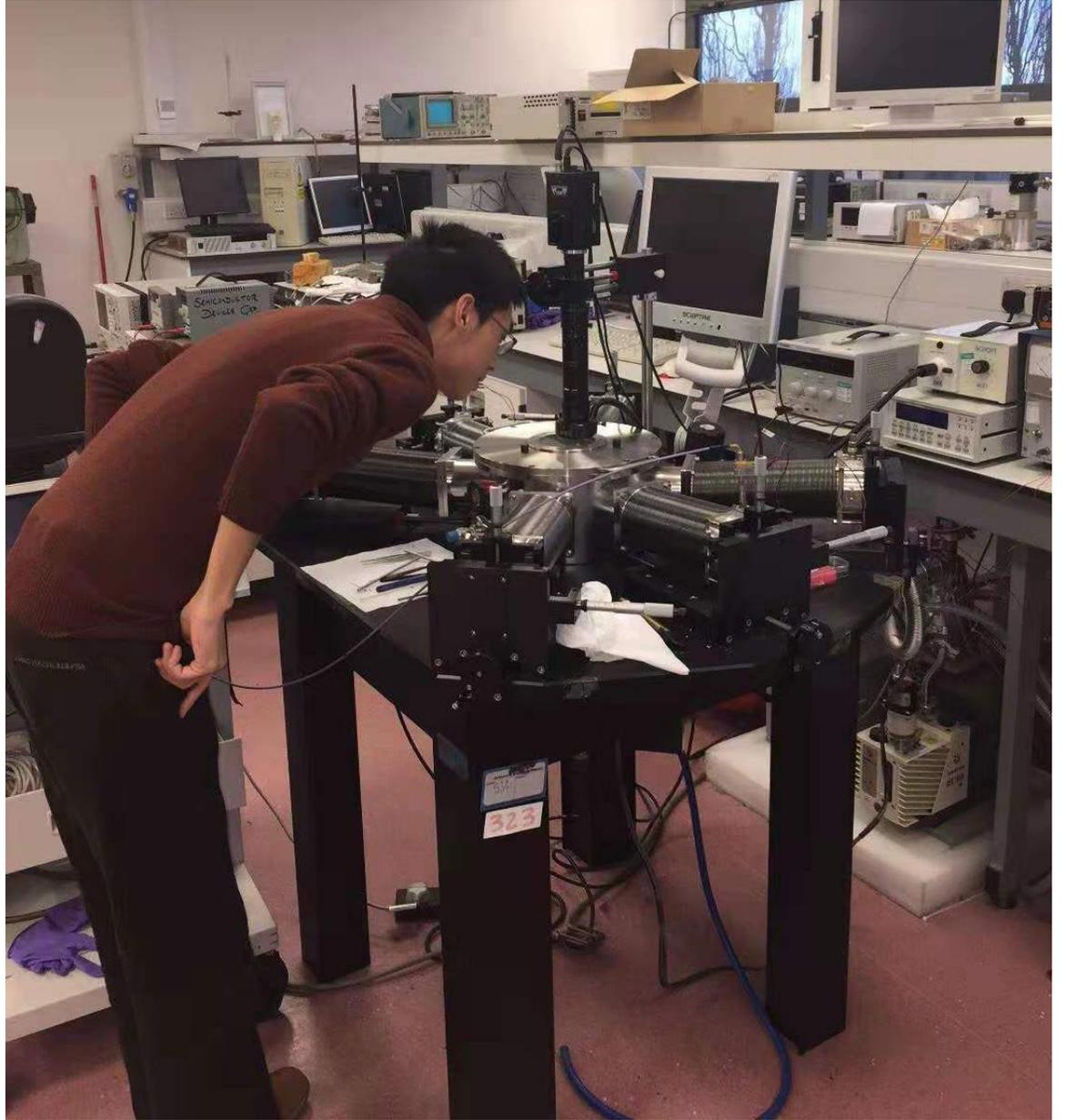
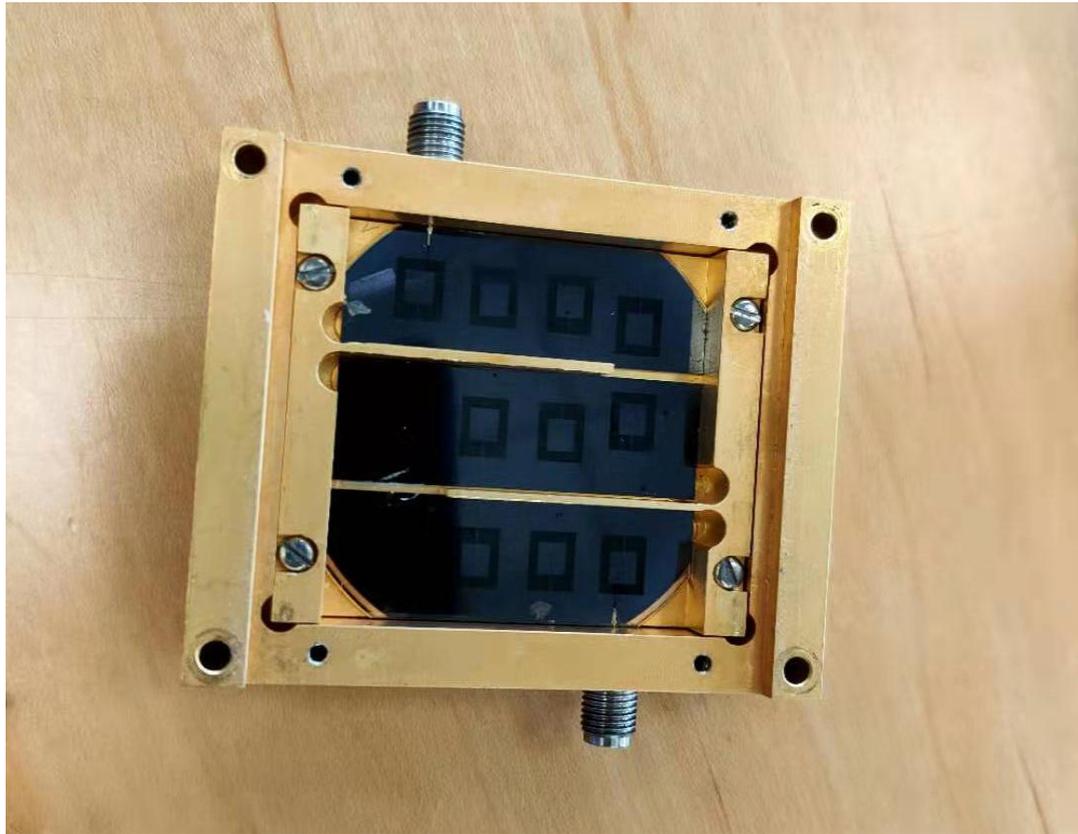
1. 高温/低温损坏仪器。
2. 低温状态空气中水分损坏设备（结冰）

如何导波不导热？

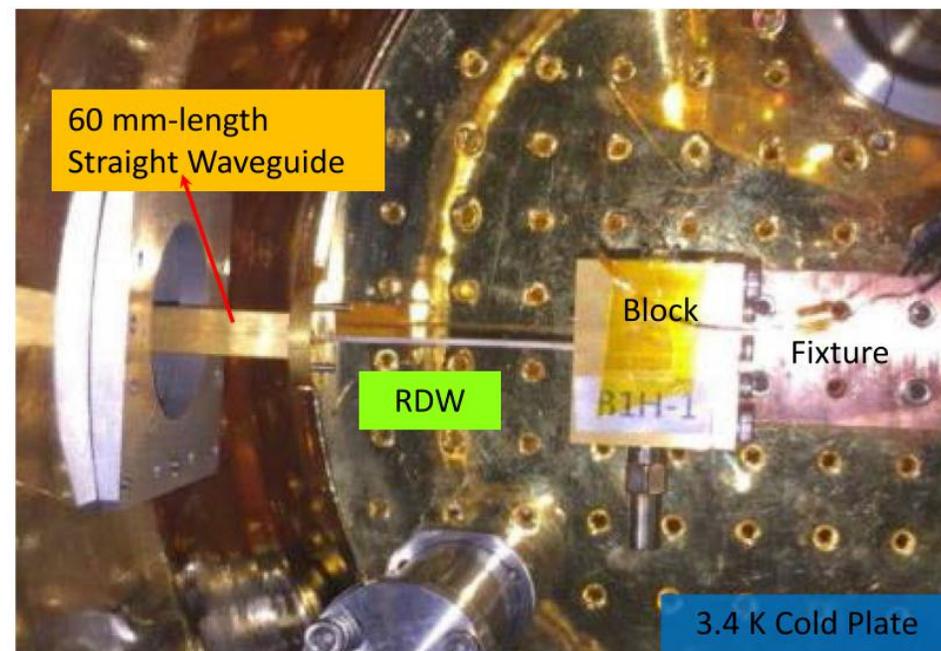
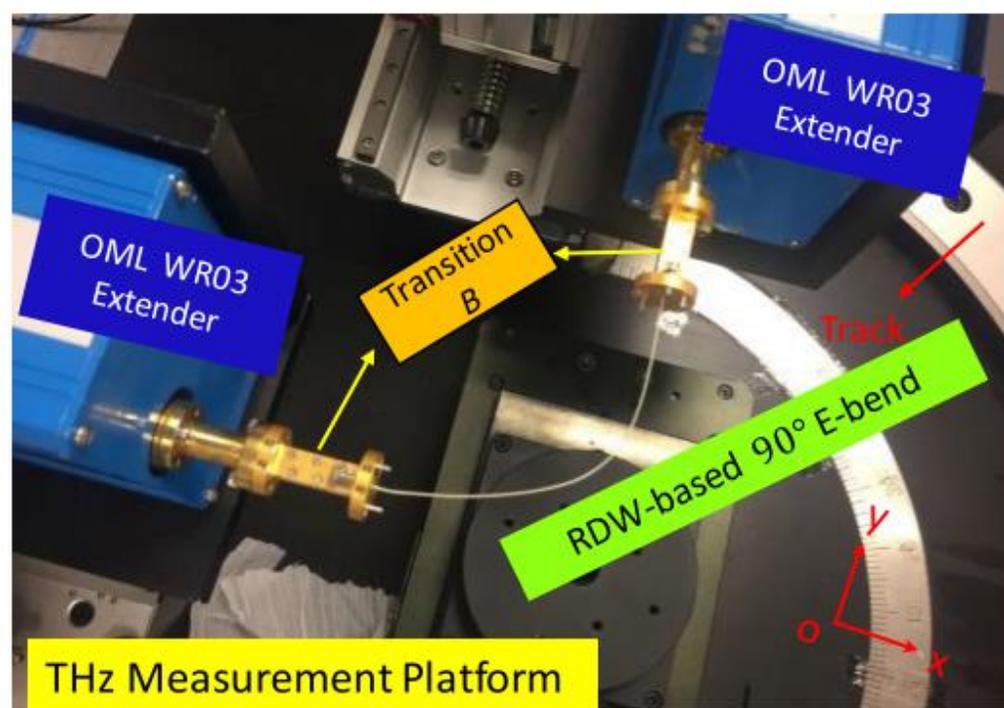
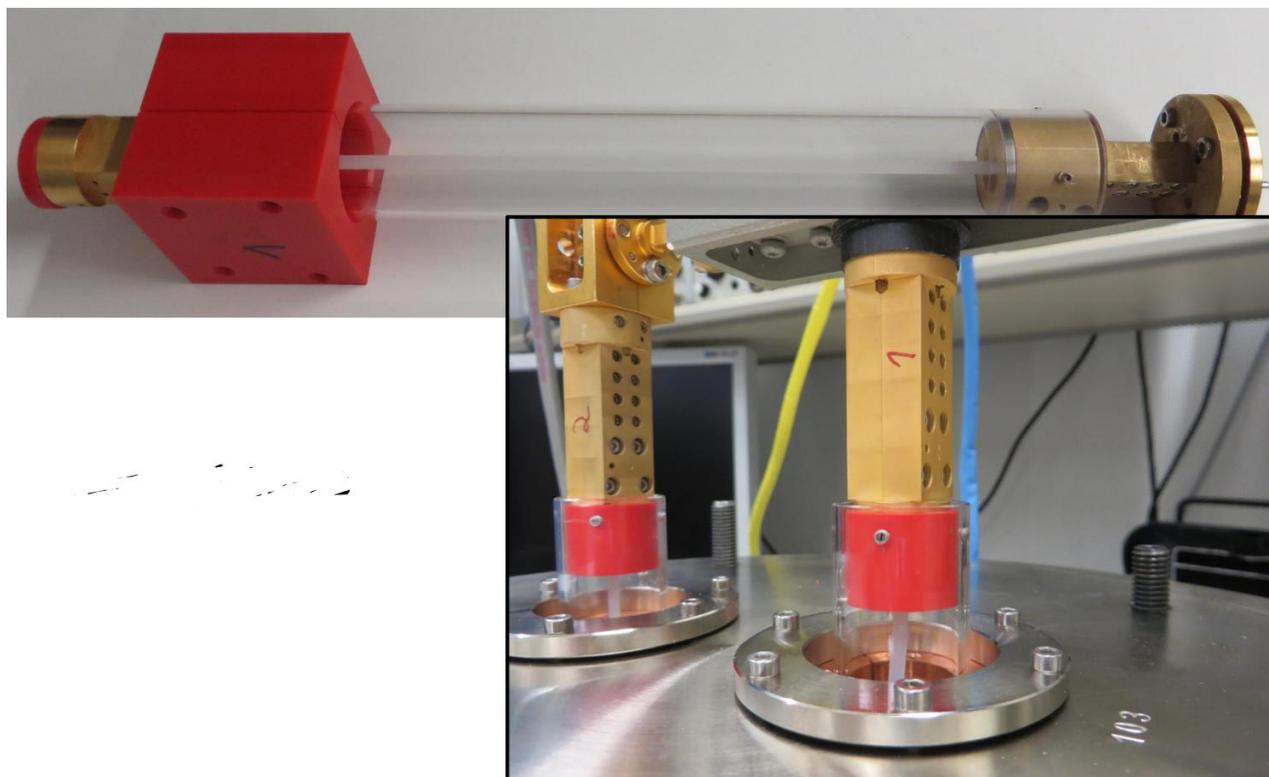


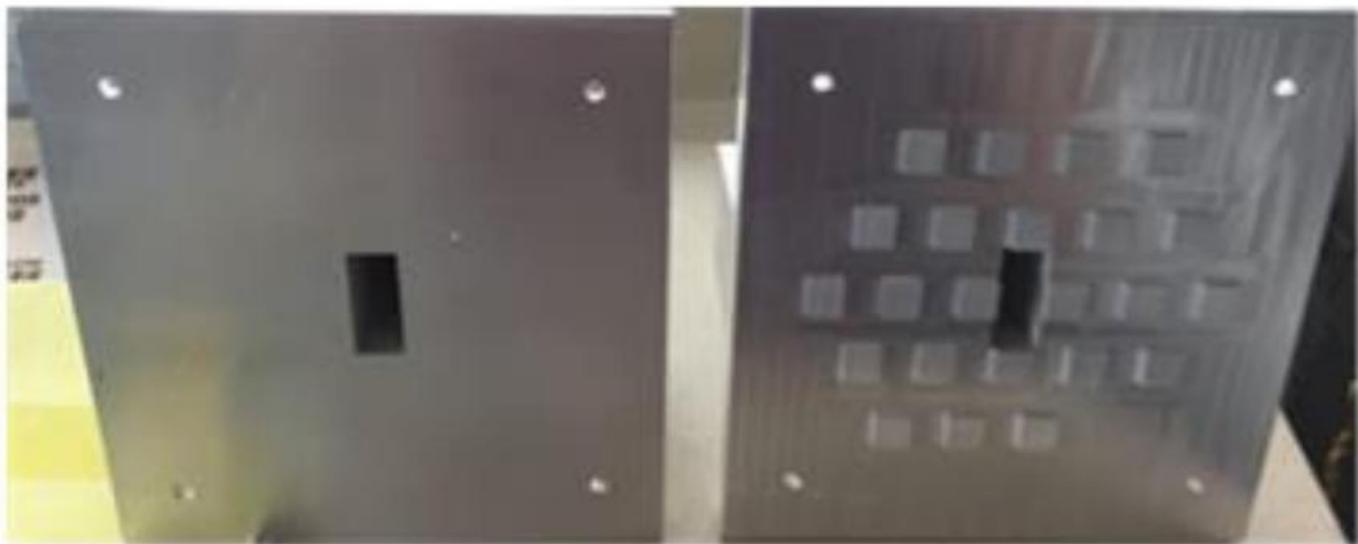
WeChat_20210426092537.mp4

案例：超导滤波器和 低温S参数测试平台

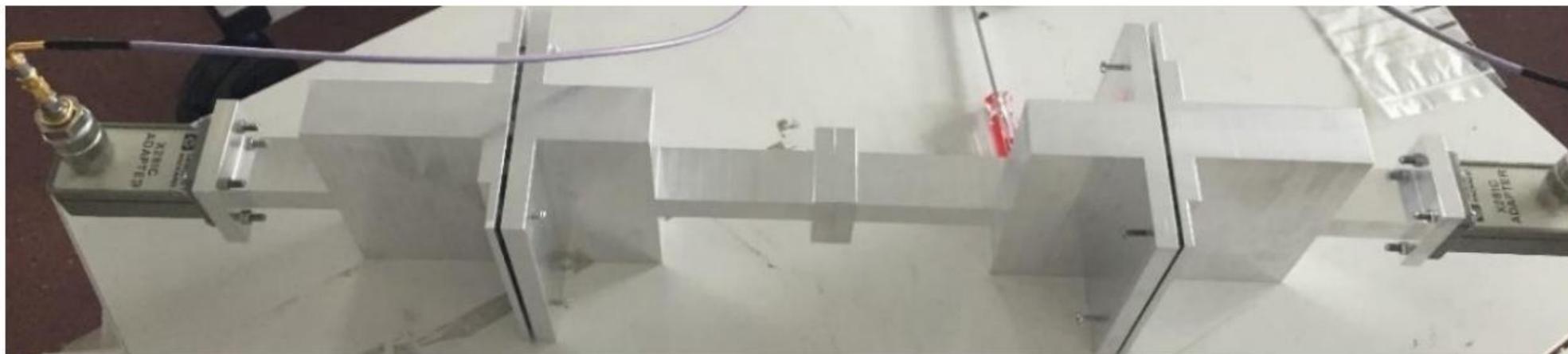


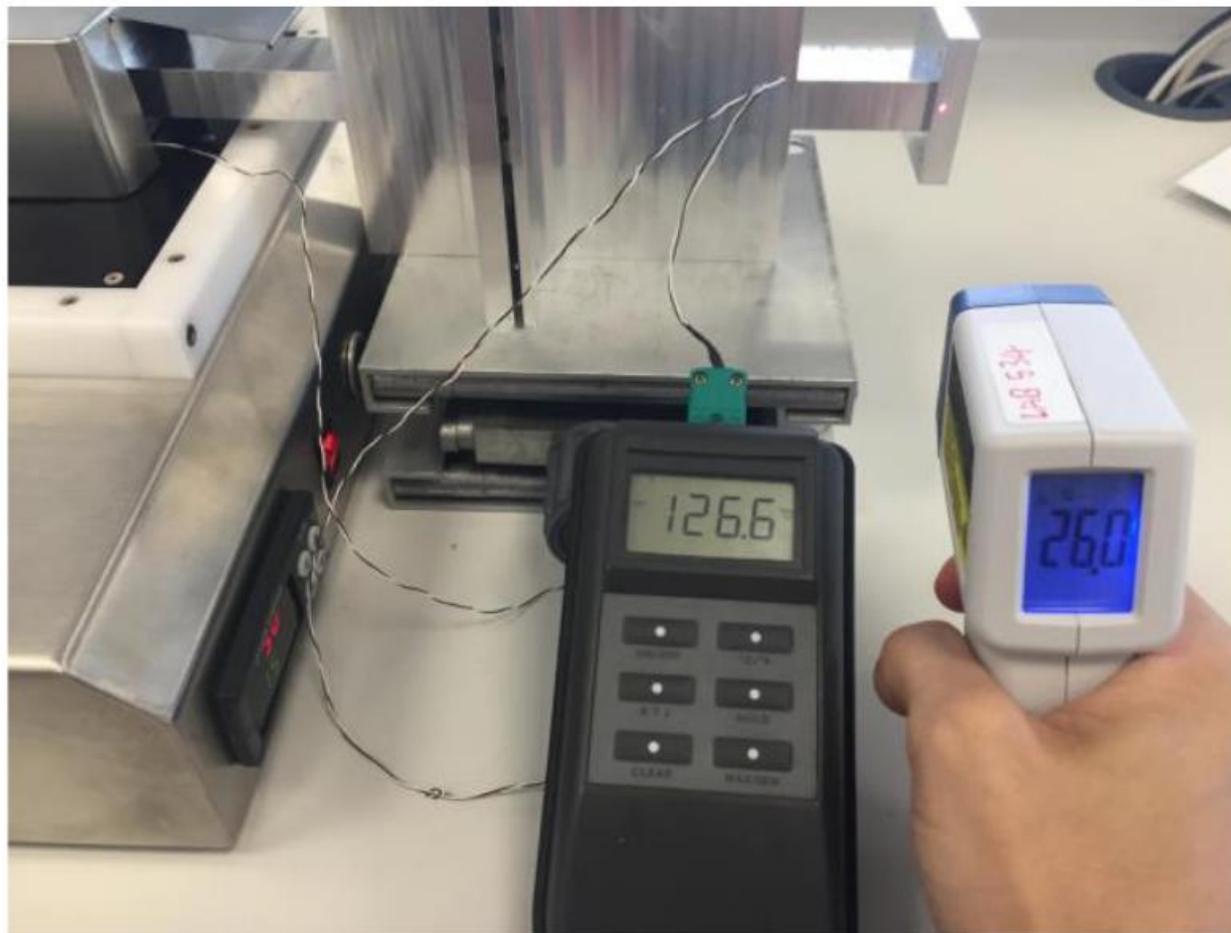
“绝热”波导设计

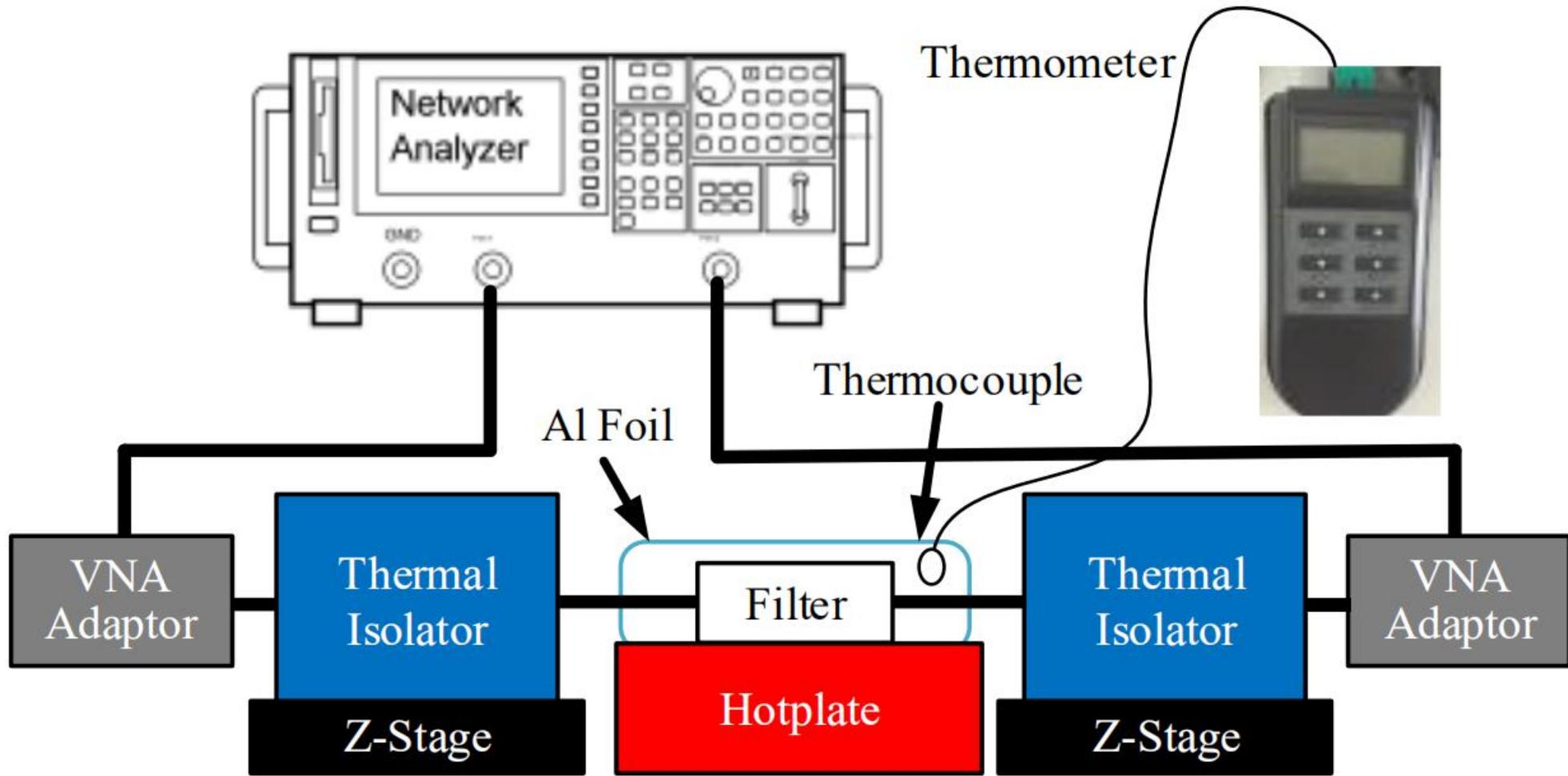


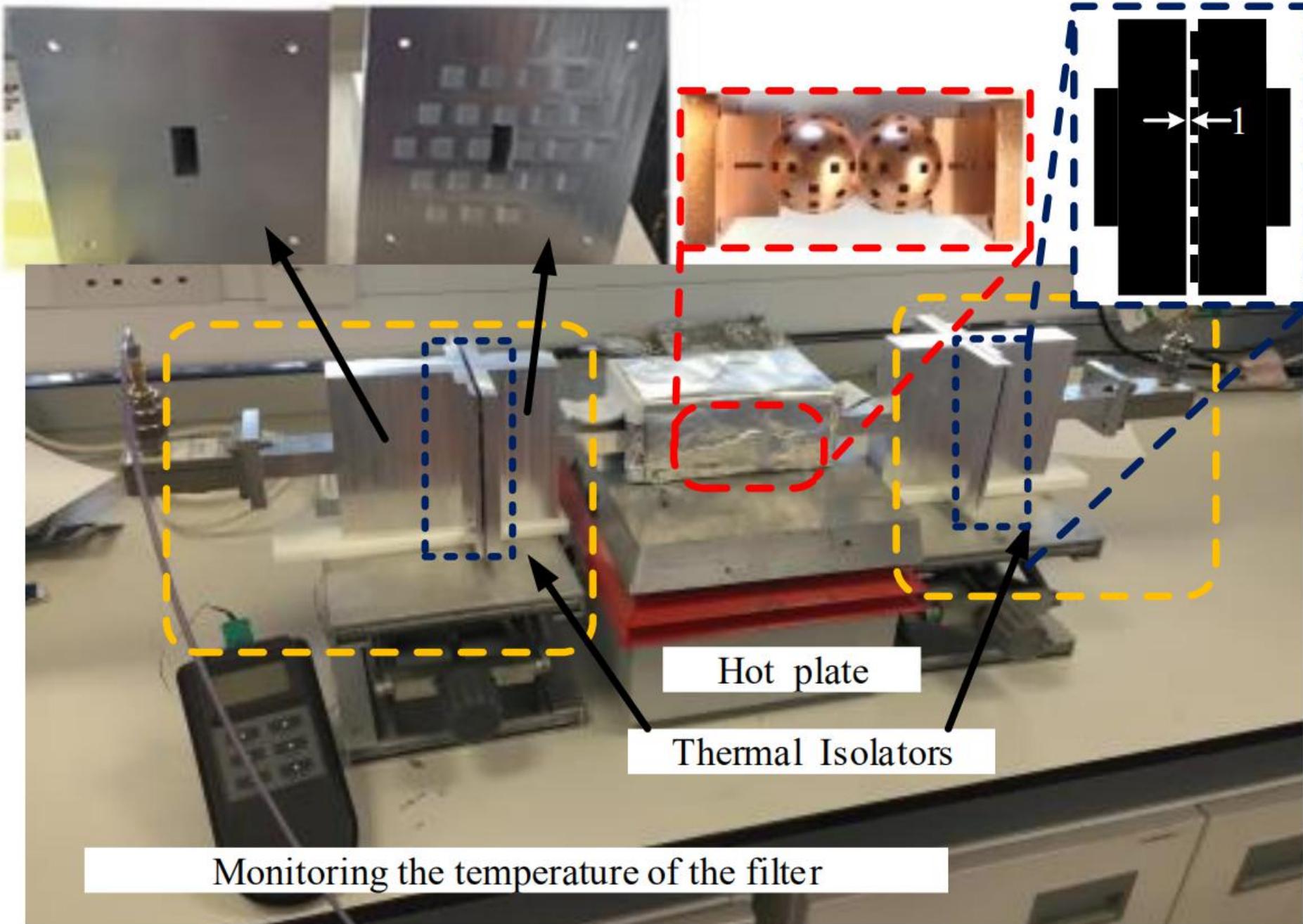


请箫竹帮我重新编辑下这两页PPT



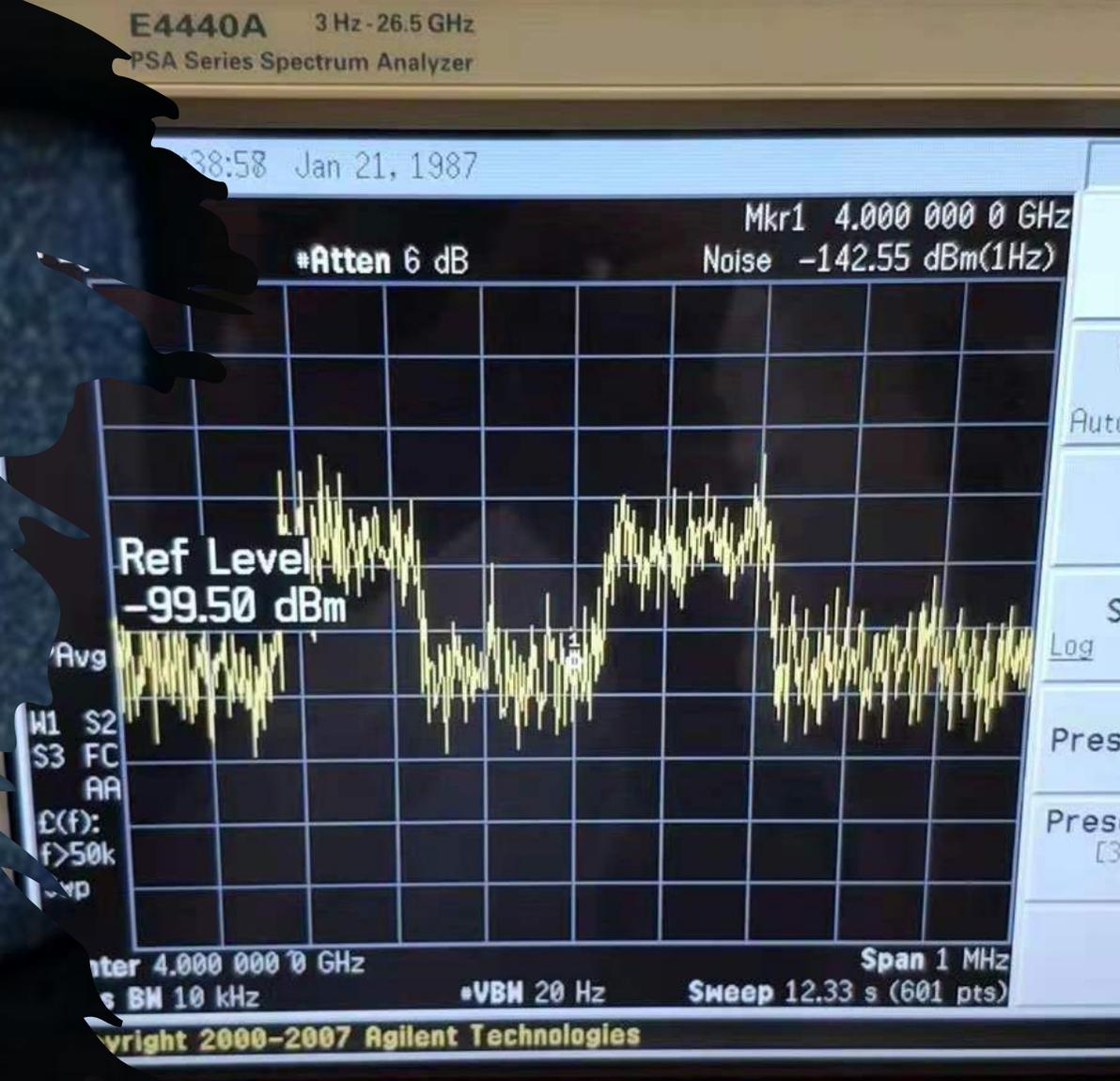






第三讲：器件和系统中的 噪声

授课教师：郭诚



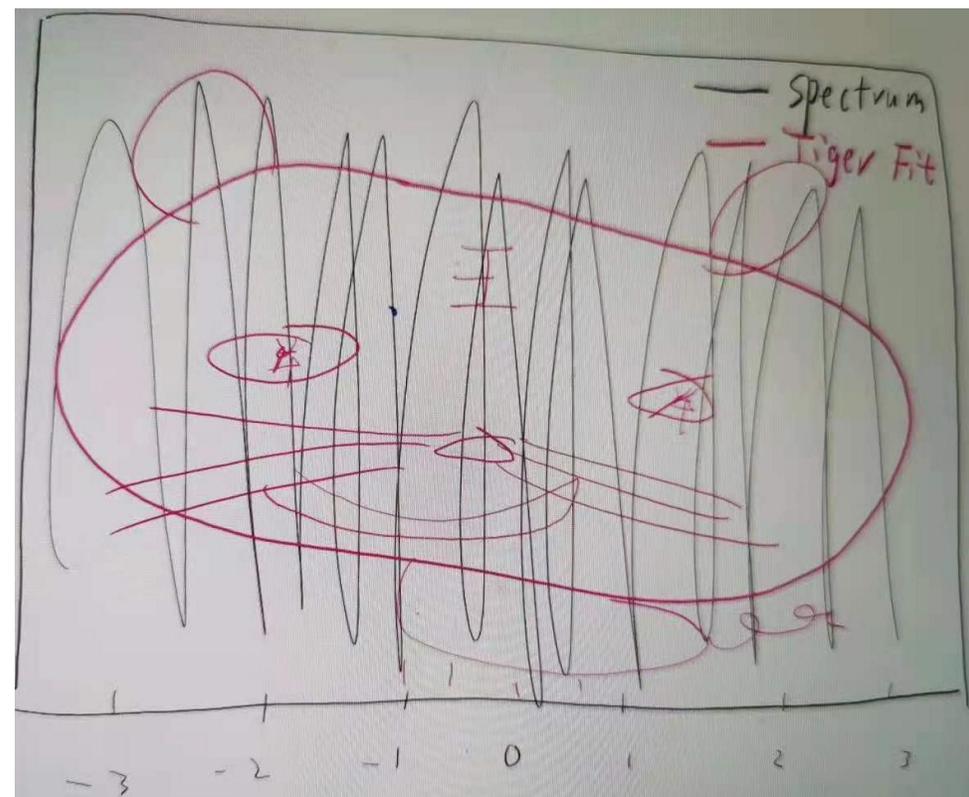
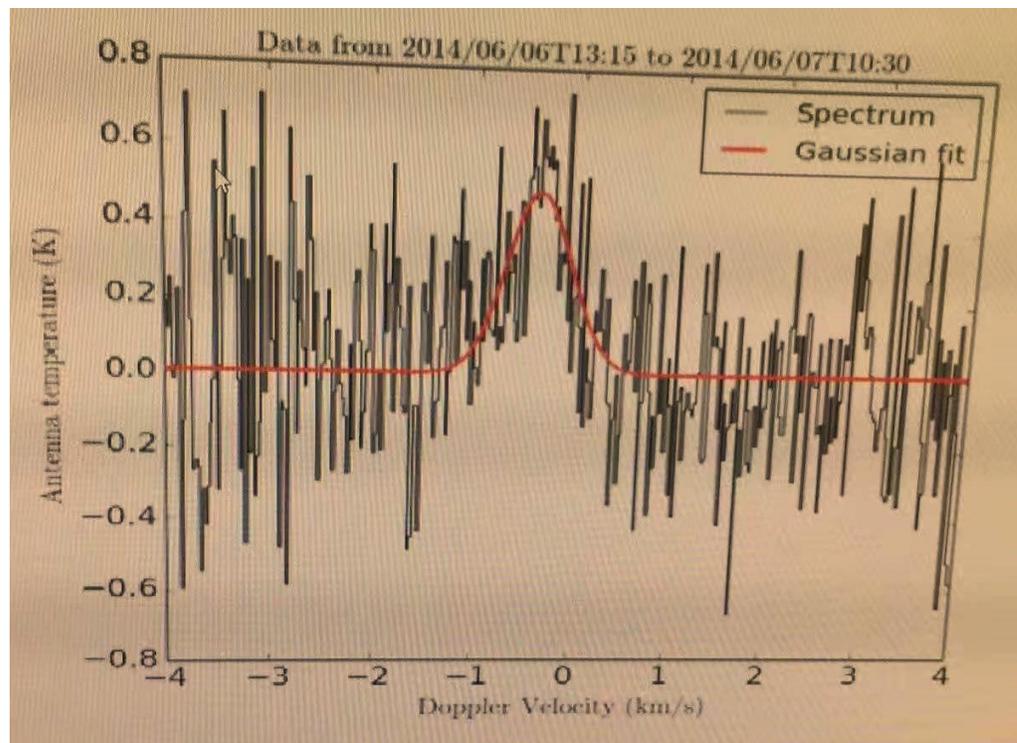
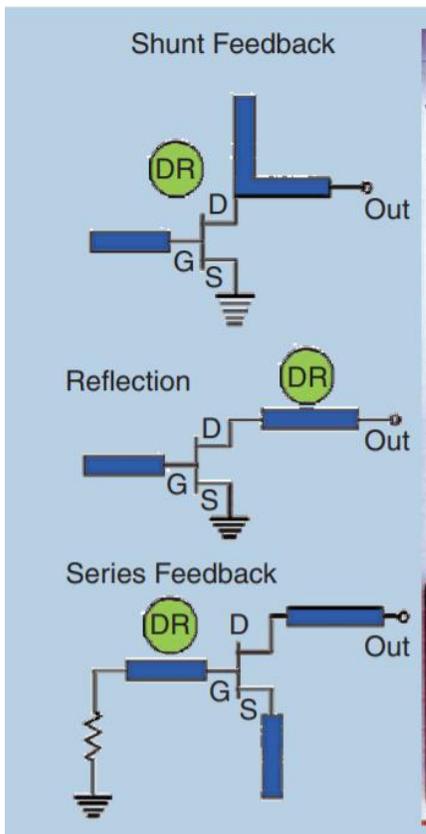
本章目录

第一节 引子，噪声的标准及噪声温度

第二节 系统中的噪声

第三节 Y因子测试方法及实例

引子：Noise, From Alpha to Omega!



在电路和各种测试系统中，噪声既是开始，也是结束！

引子：噪声、能量与信息

奈奎斯特定理：在无噪声的情况下，如果带宽为B，那么可被传输的最大信号速率就是2B

1Hz---> 2Baud

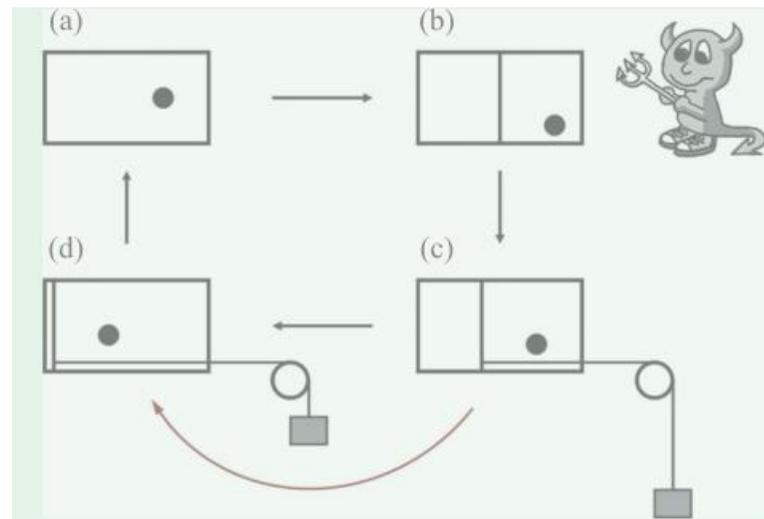
香农定理：

$$C = BW \cdot \log_2(1 + S / N)$$

热噪声功率

$$P_n = kT \cdot BW$$

思考，这三个公式的量纲各是什么？



$$W = kT \cdot \ln(2)$$

兰道尔原理：处理1bit
信息所需要的能量

麦克斯韦妖与信息处理的物理极限*

孙昌璞^{1,*} 全海涛^{2,**}

(1 中国工程物理研究院北京计算科学研究中心 北京 100084)

(2 北京大学物理学院 北京 100871)

量纲分析

$$C = BW \cdot \log_2(1 + S / N)$$

$$[C] = [BW] = [1 / s]$$

香农定理

$$P_n = kT \cdot BW$$

$$[P_n] = [J] \cdot [1 / s]$$

热噪声功率（普朗克-Rayleigh近似）

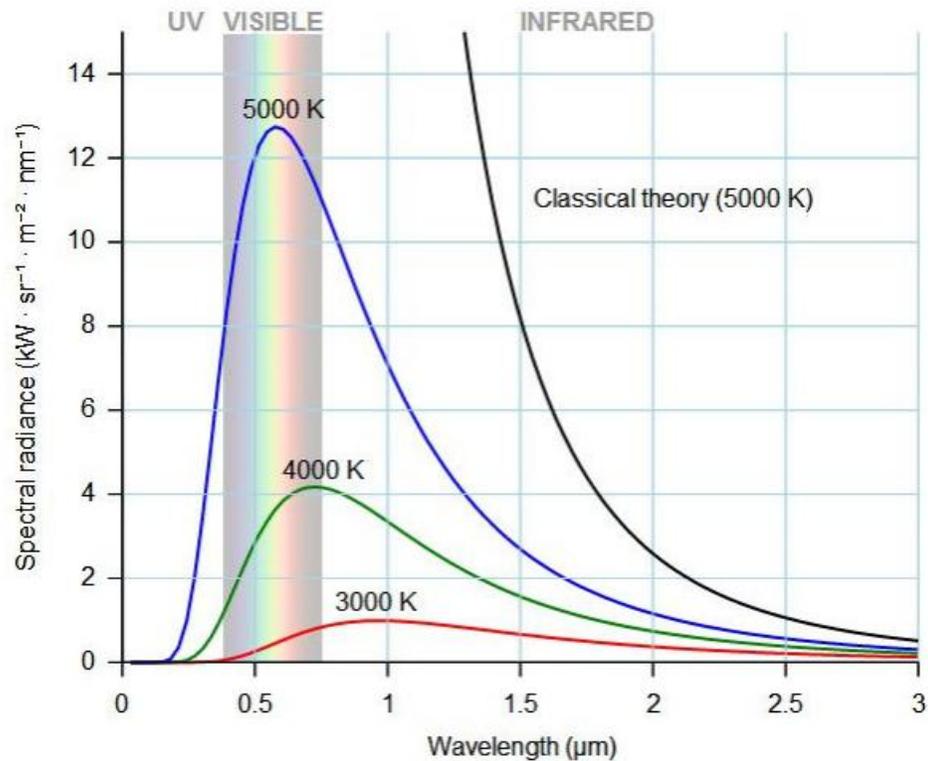
$$W = kT \cdot \ln(2)$$

$$W = [J]$$

兰道尔原理：处理1bit
信息所需要的能量

$$[P_n] = [W] \cdot [C]$$

黑体辐射和噪声功率



噪声功率只和带宽和温度有关!
 噪声的标准也是温度! (和功率一样)

R 电阻两端产生的随机电压的均方根值由普朗克黑体辐射定律给出:

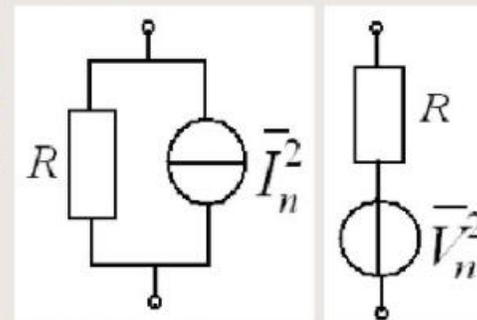
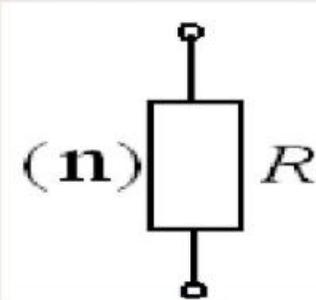
$$V_n = \sqrt{4hfBR / (e^{hf/kT} - 1)}$$

在Rayleigh - Jeans近似下:

$$V_n = \sqrt{4hfBR / (hf / kT)} = \sqrt{4kTBR}$$

在带宽 B 内, 由 R 电阻传输到匹配负载的噪声功率

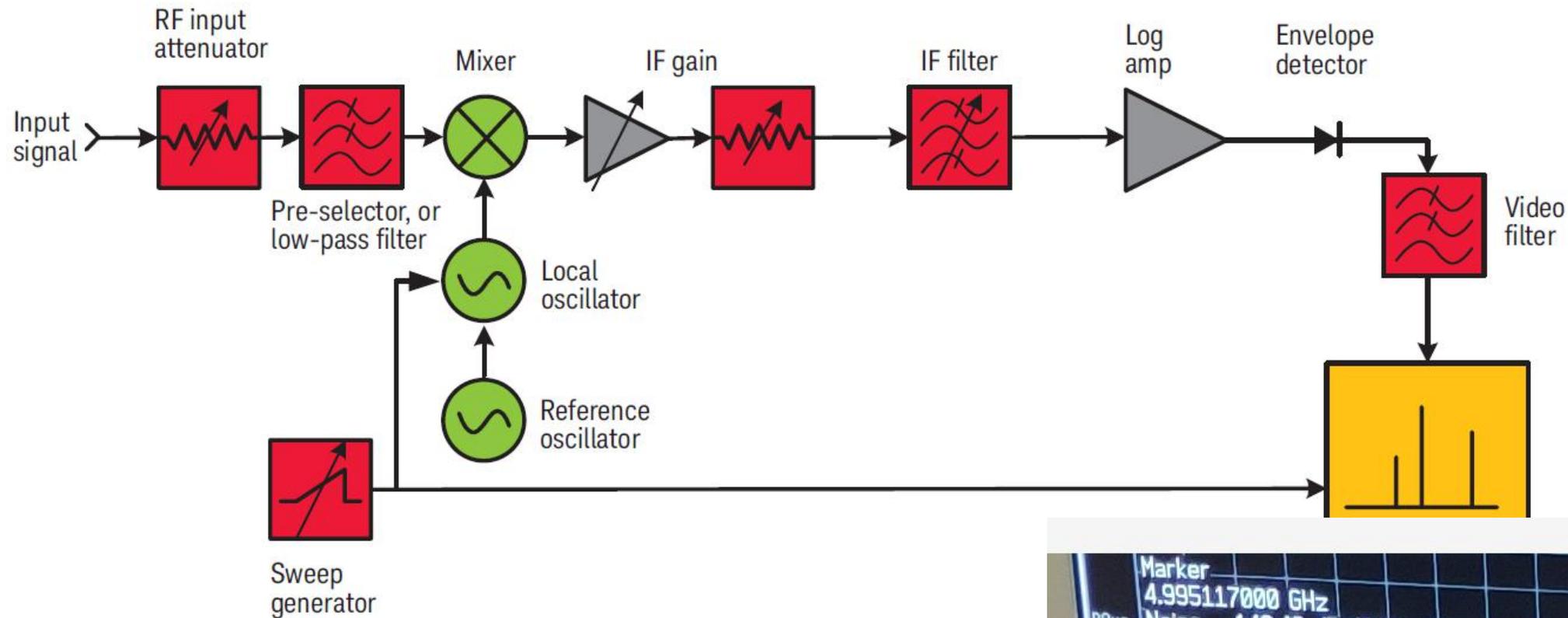
$$P_n = (V_n / 2R)^2 R = kTB$$



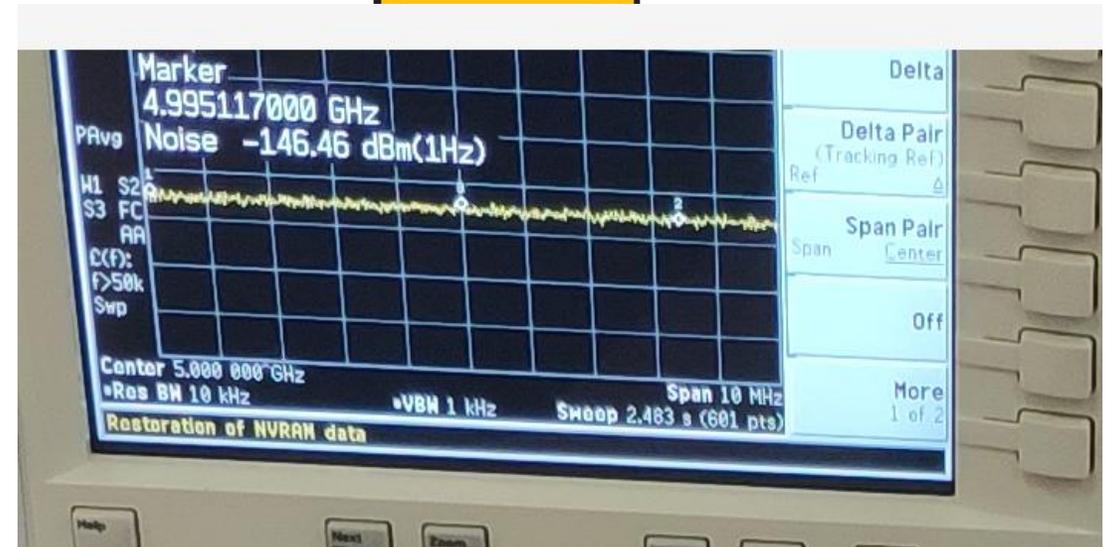
$$P_n = kT \cdot BW$$

$$T_e = \frac{P_n}{k \cdot BW} \quad \text{噪声温度}$$

例：频谱仪的底噪（1）：

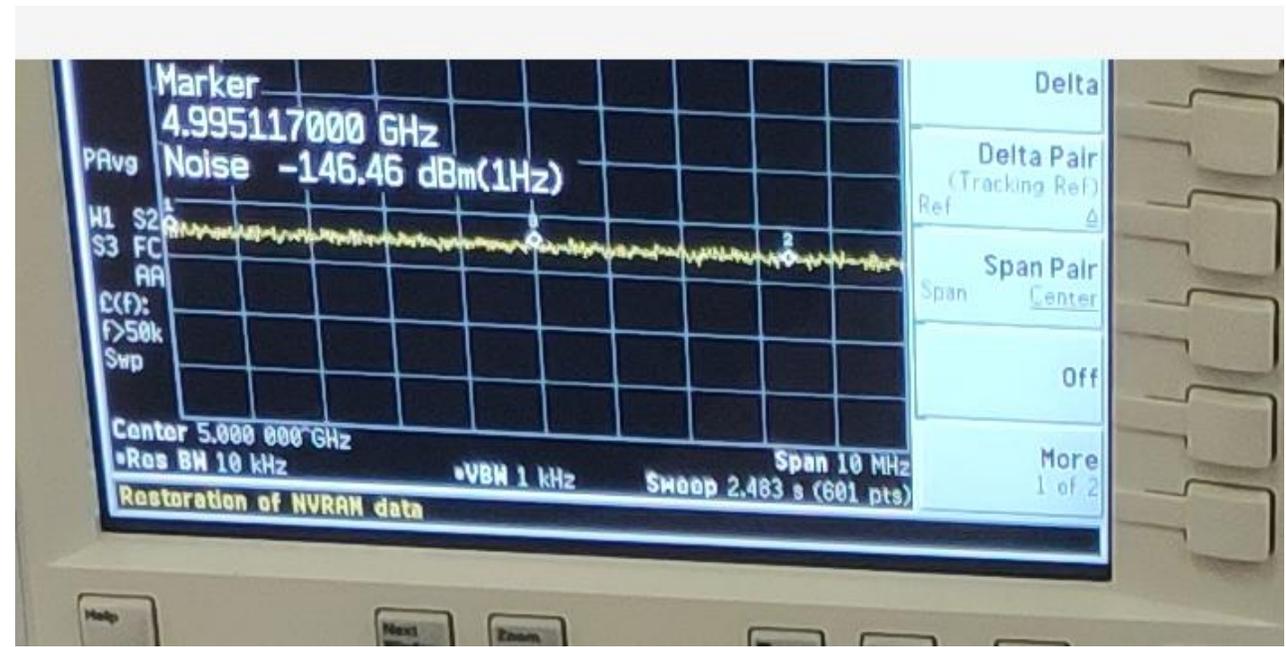


$$P_{1\text{Hz}} = kT = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} / \text{K} \cdot 290\text{K}$$
$$= -173\text{dBm} / \text{Hz}$$



例：频谱仪的底噪（2）：

$$P_{1\text{Hz}} = kT = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} / \text{K} \cdot 290\text{K}$$
$$= -173\text{dBm} / \text{Hz}$$



$$P_{\text{noise}} = -146.46\text{dBm/Hz} + 40\text{dB} = -106.46\text{dB}$$

$$\text{BW} = 10\text{kHz} \quad (40\text{dB})$$

小结

- 1. 和功率一样，**噪声的标准是温度**。本质是黑体辐射的（噪声）功率随温度变化而变化。
- 2. （热）噪声功率与**温度和带宽相关**
- 3. 工程上通常用**噪声温度描述噪声功率的大小**

$$P_n = kT \cdot BW$$

$$T_e = \frac{P_n}{k \cdot BW}$$

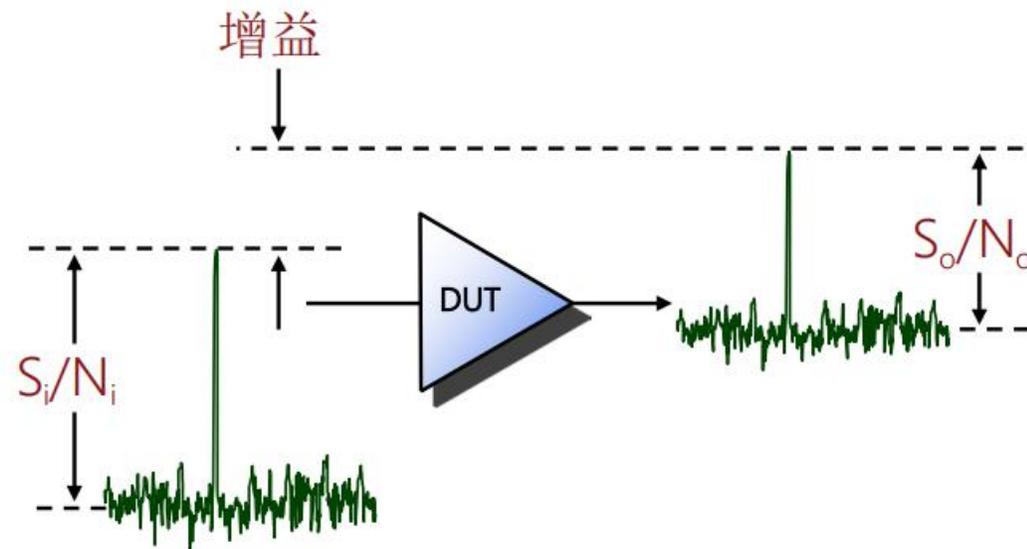
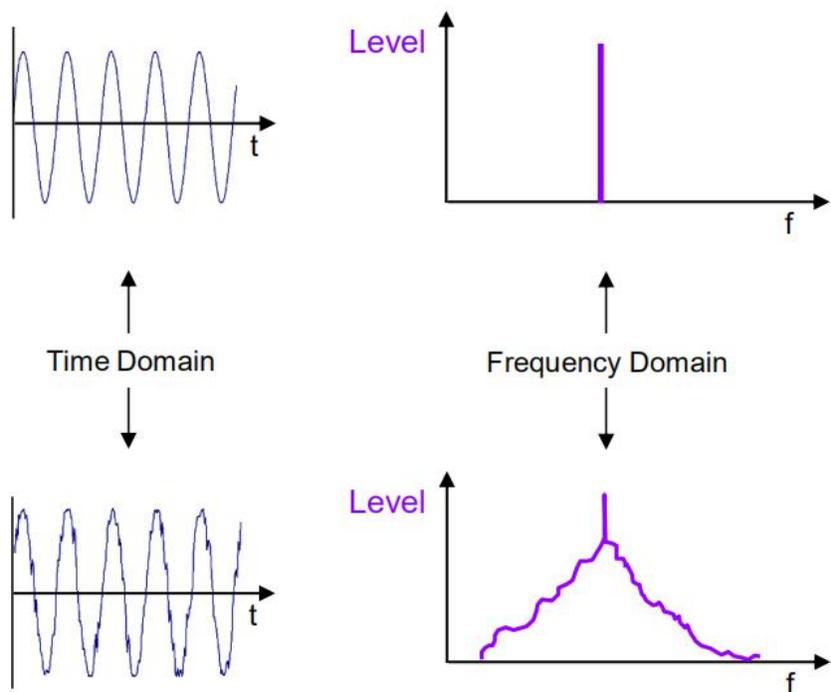
本章目录

第一节 引子，噪声的标准及噪声温度

第二节 器件和系统中的噪声

第三节 Y因子测试方法及实例

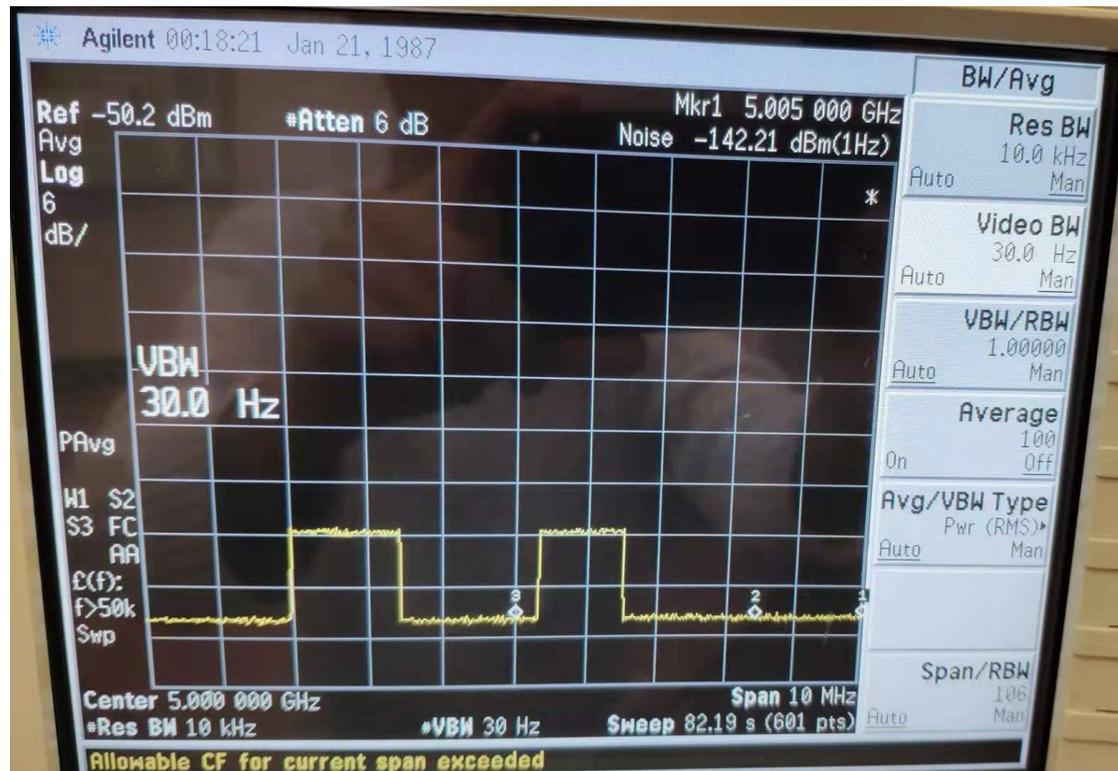
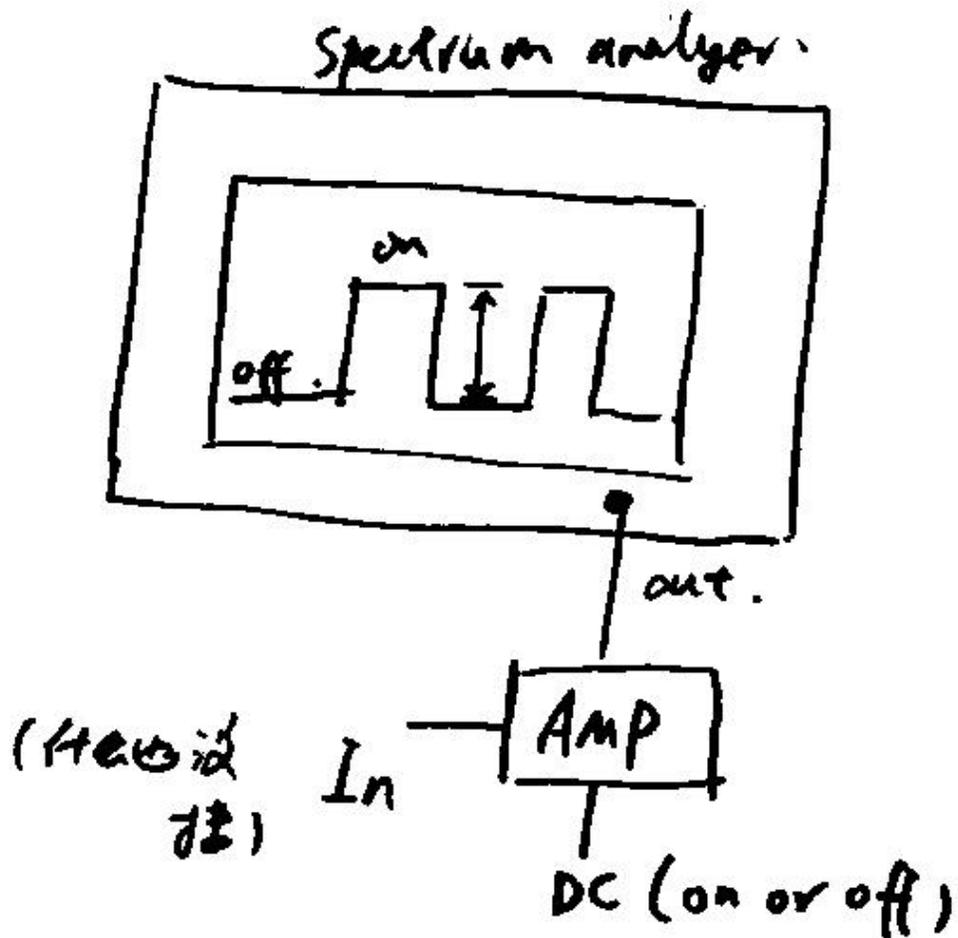
有源器件的噪声



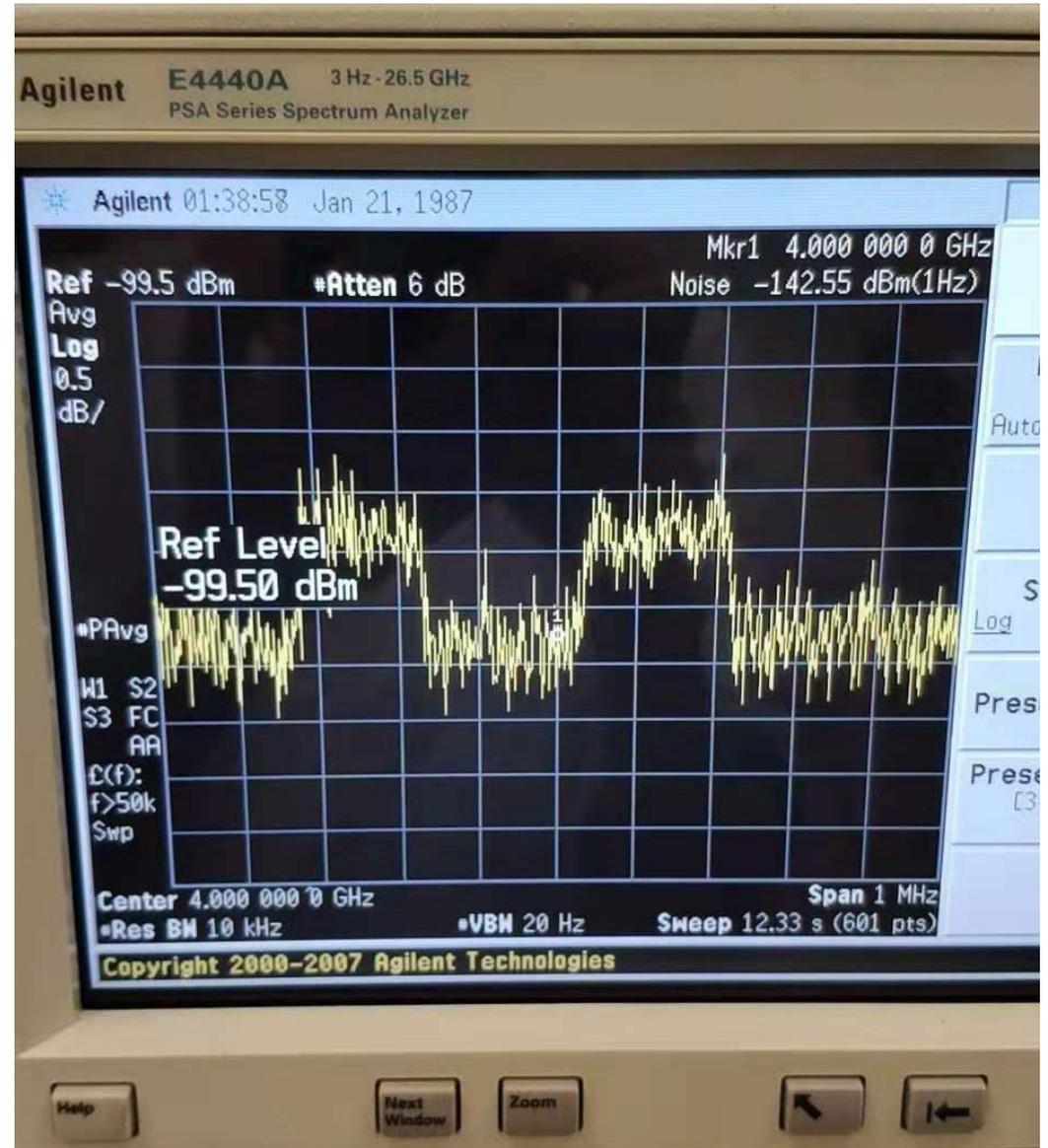
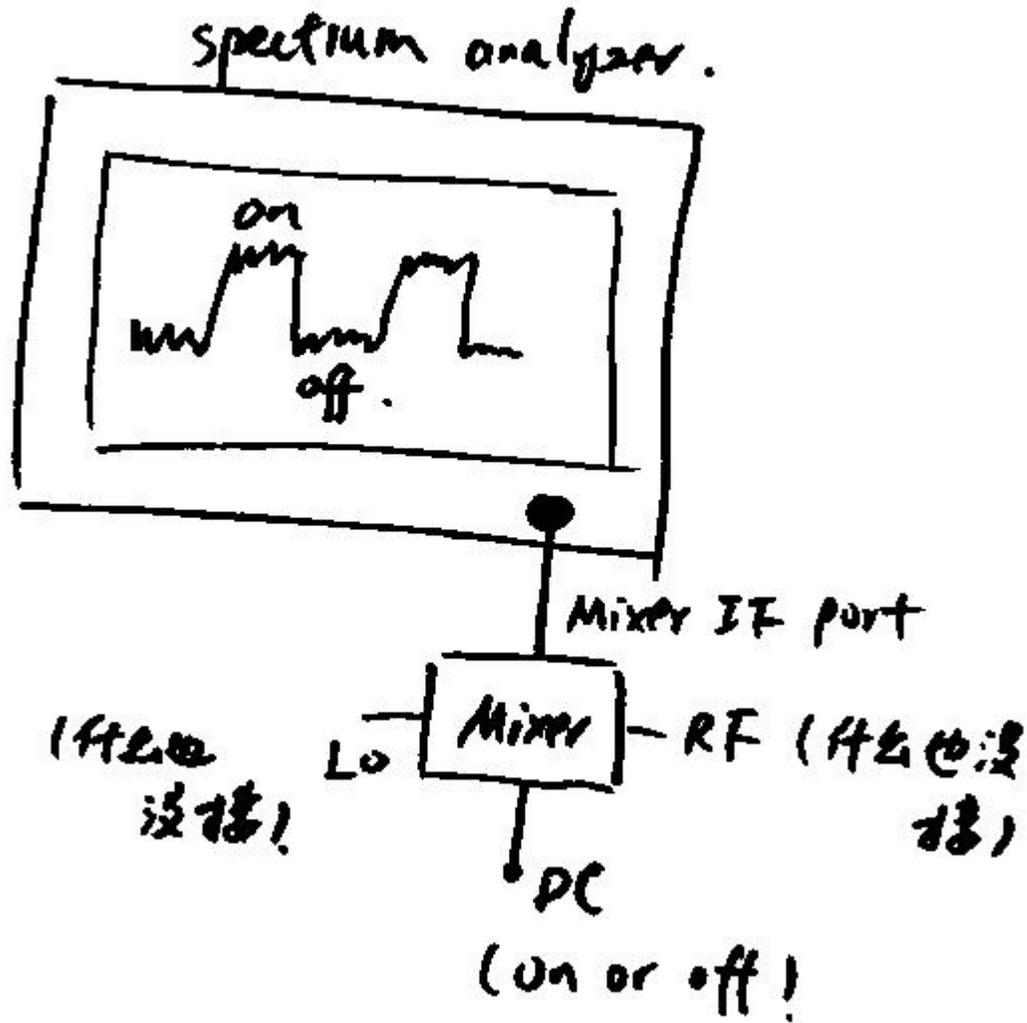
$$NF = \frac{\text{输入信噪比}}{\text{输出信噪比}} = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o}$$

$$NF_{\text{dB}} = 10 \log (NF)$$

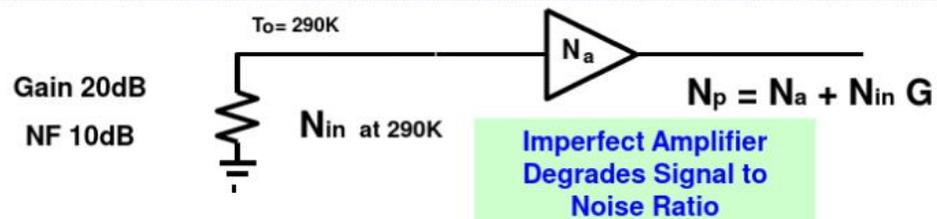
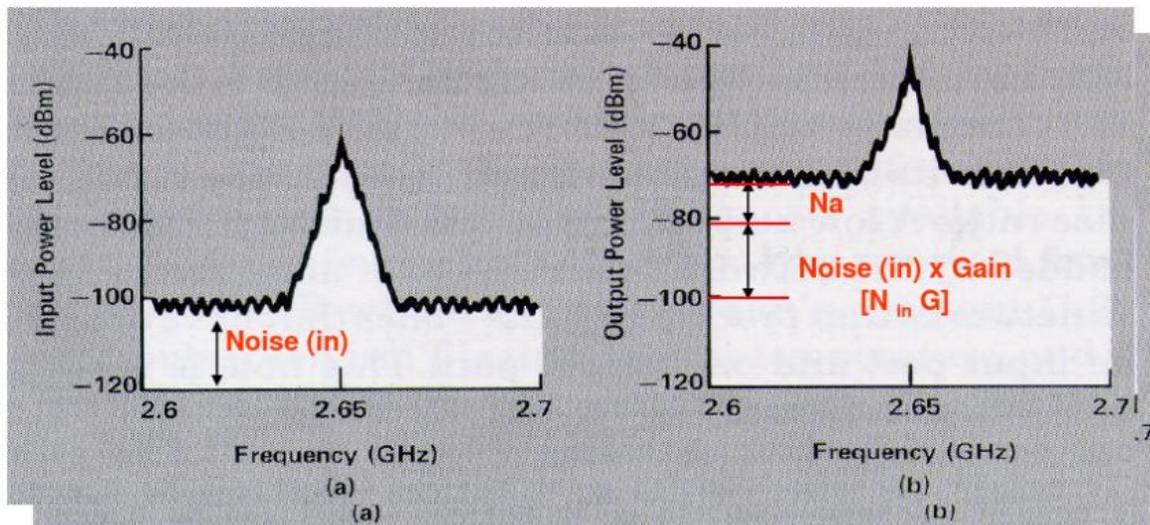
例：放大器 ($G > 1$) 中的噪声



例：混频器 ($G < 1$) 中的噪声

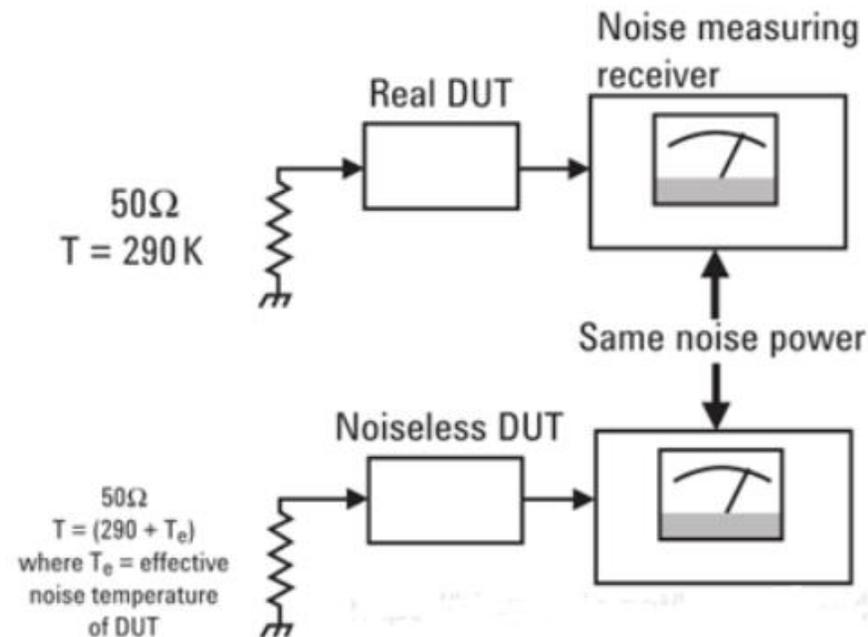


噪声系数与噪声温度



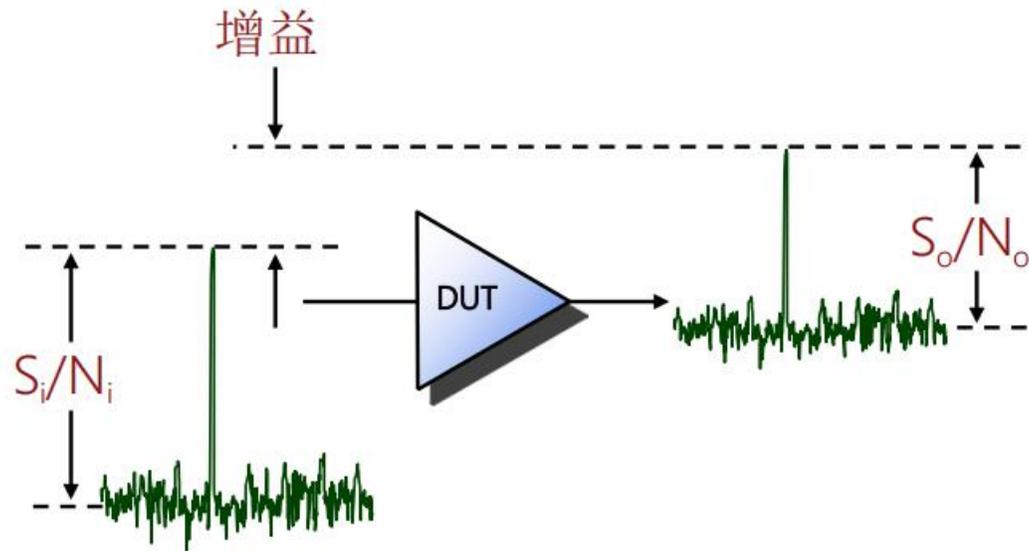
$$NF = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} = \frac{T_0 + T_e}{T_0} = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

例: $NF=2$ (3dB) , $T_e=T_0=290K$

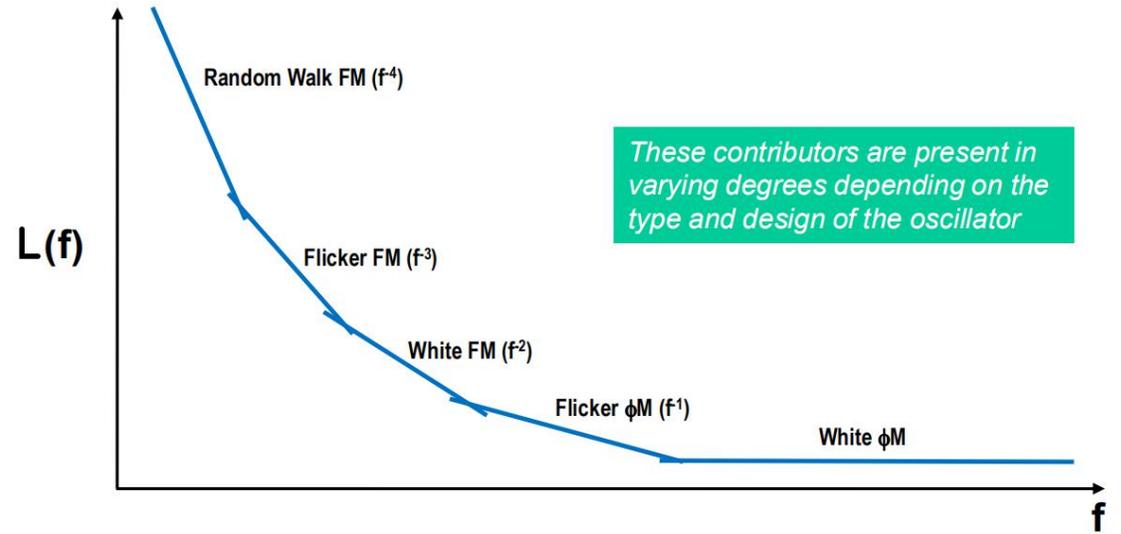


T_e : 等效噪声温度

常见的两类噪声测量问题



1. 噪声系数/噪声温度
关心能量，接收机系统!
(输入噪声较弱，内部
噪声占主导)

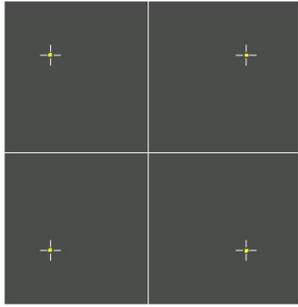


- Random Walk:** Close to carrier, generally caused by environmental effects
- Flicker FM:** Related to active oscillator physical resonance mechanism, power supply noise
- White FM:** Related to passive resonator oscillators
- Flicker ϕ M:** Related to noisy amplifiers and multipliers
- White ϕ M:** Far from carrier, generally caused by broadband output amplifier noise

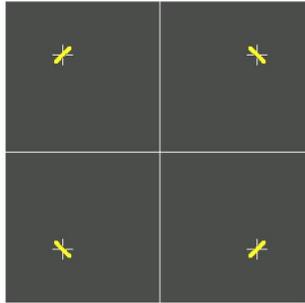
2. 相位噪声
关心能量和分布
发射机系统/频率源
(输入噪声较强)

Modulation quality (phase error, EVM) is degraded by phase noise

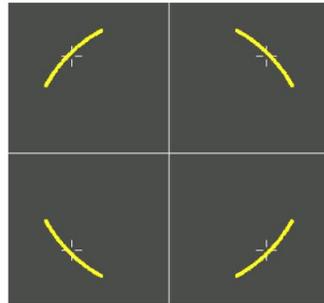
幅度噪声和相位噪声



<math><0.2\%</math> EVM



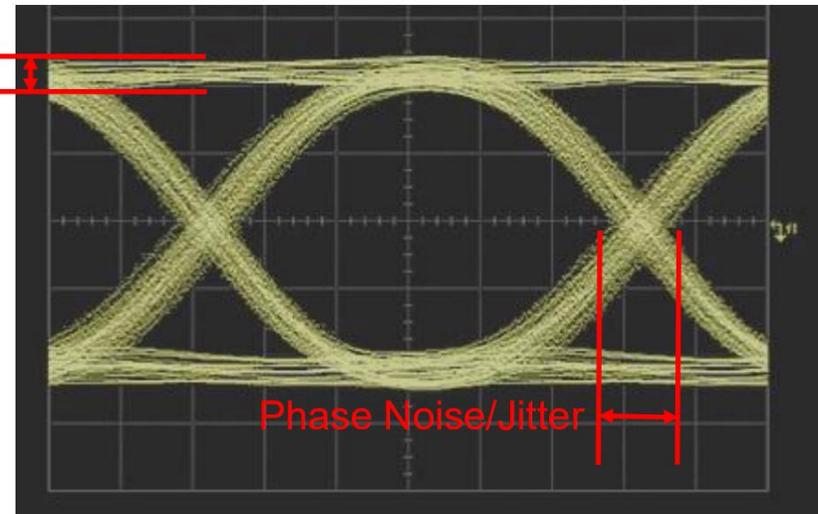
5% EVM



20% EVM

High Phase Noise = High Jitter

Amplitude
(AM) Noise



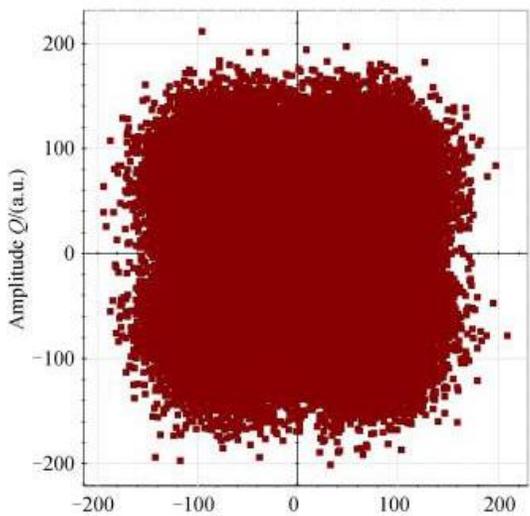
Digital Clock
Eye Diagram

Jitter peaks can cause transmitted symbol errors which

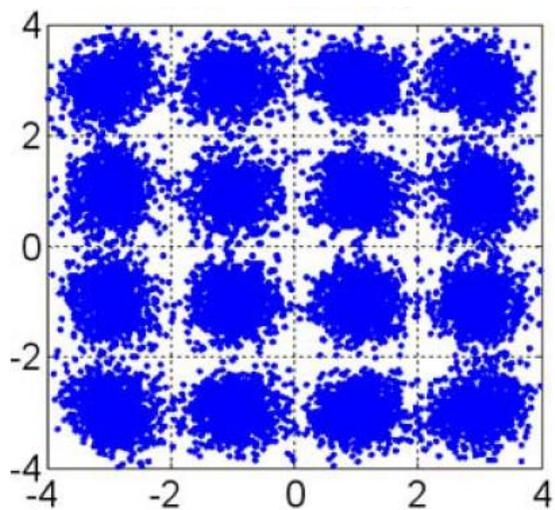
幅度噪声和相位噪声



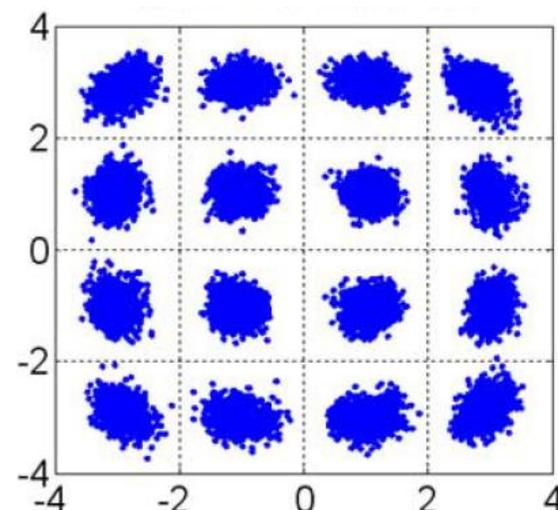
噪声淹没信号



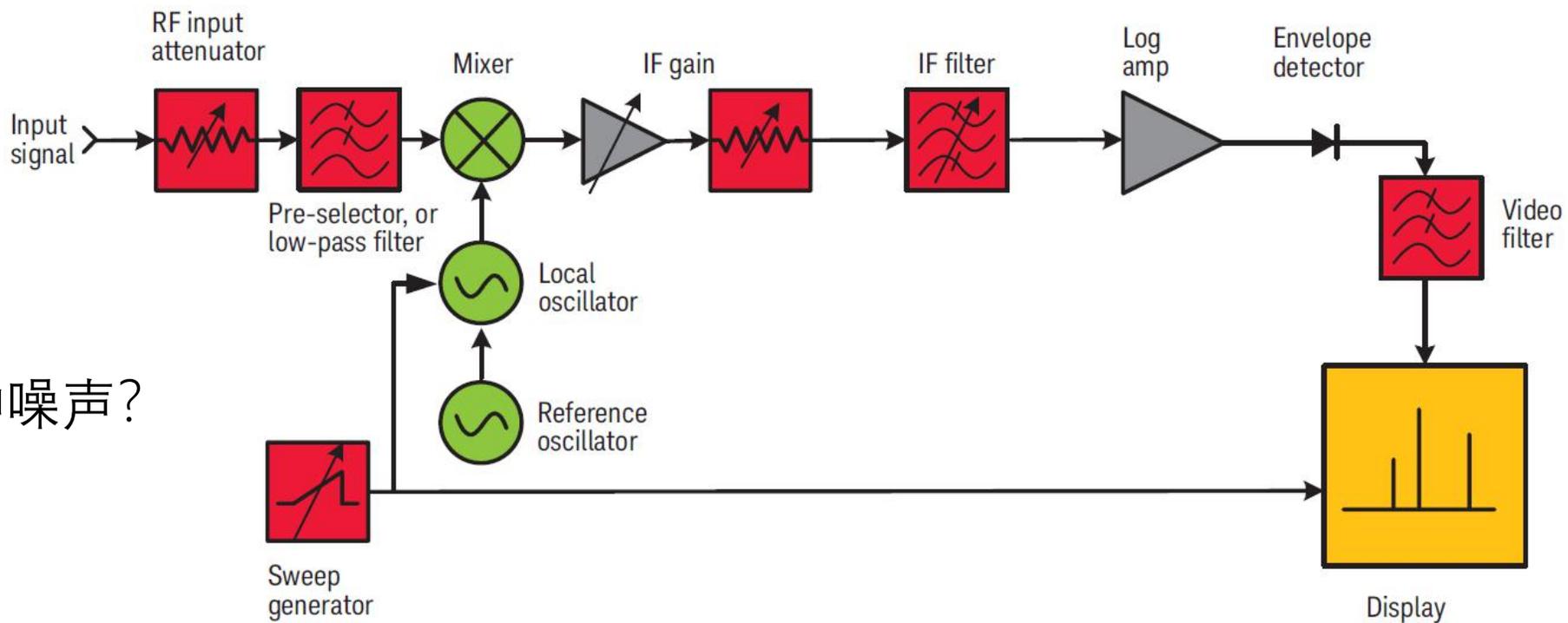
信号强度和噪声差不多



信号远大于噪声

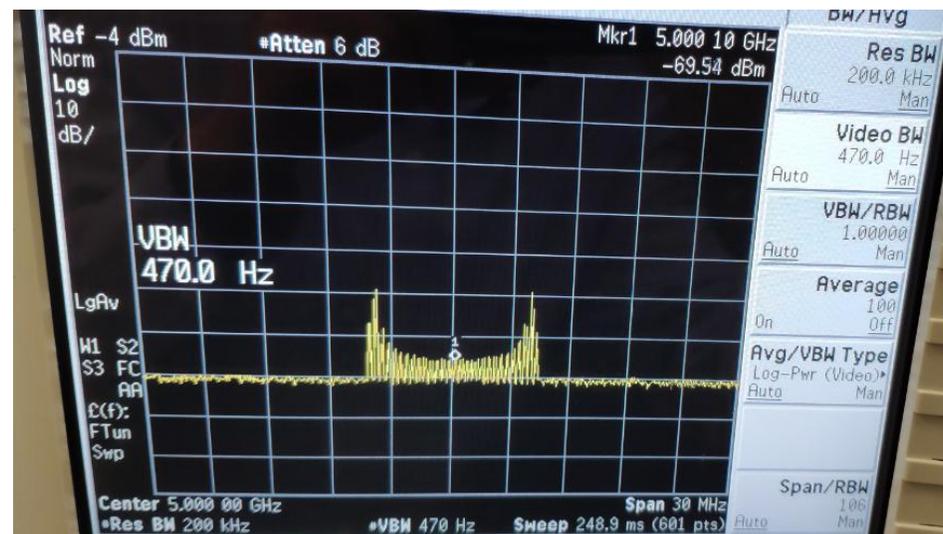
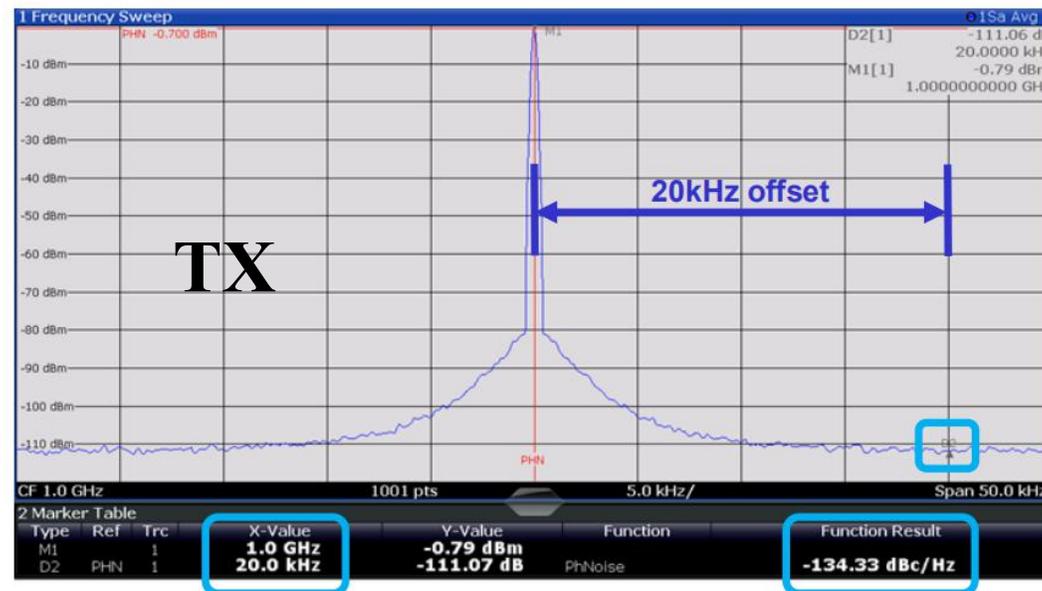
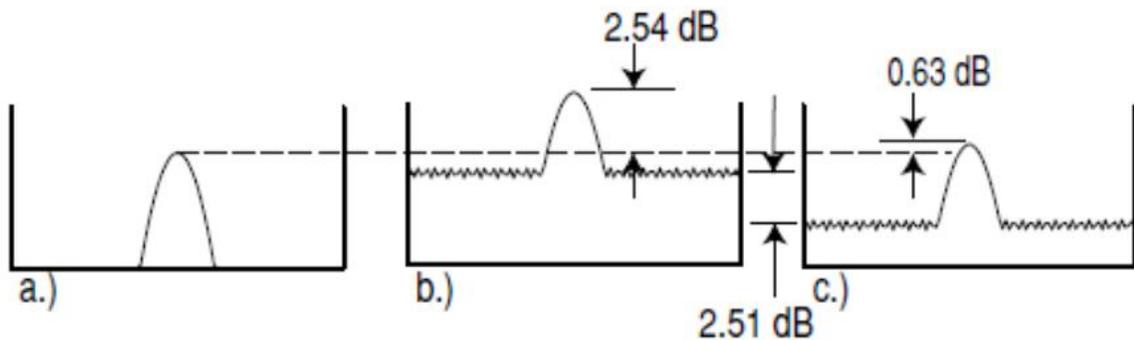


例：噪声的直接测量（1）



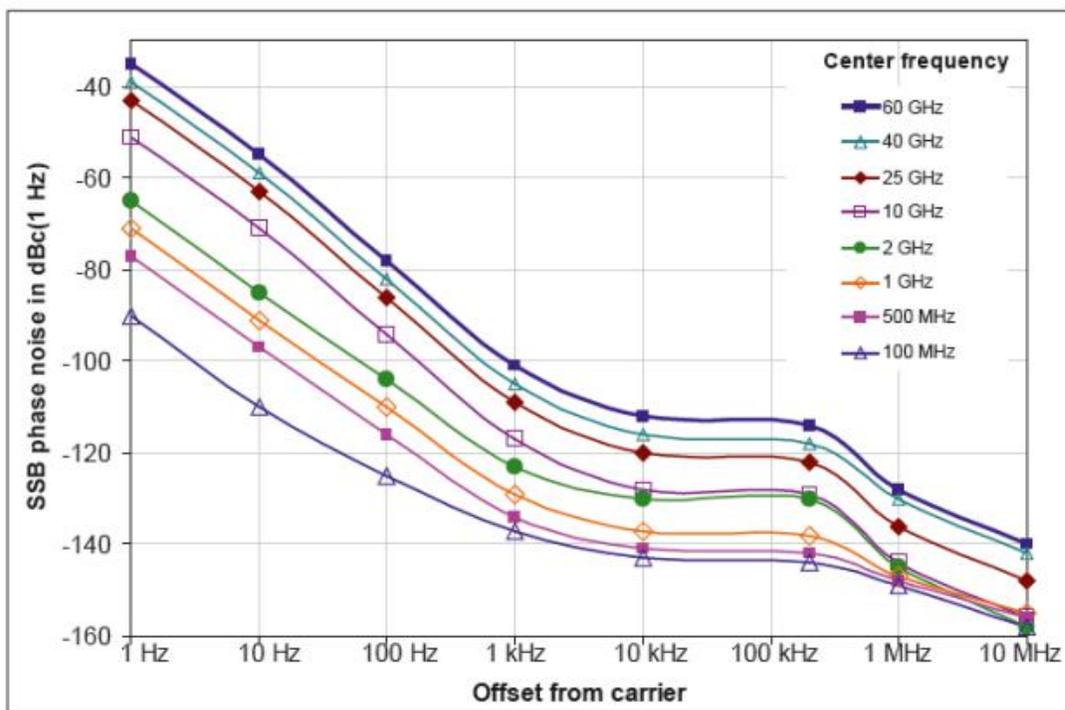
思考：适合测量哪种噪声？

例：噪声的直接测量（2）



例：噪声的直接测量（3）

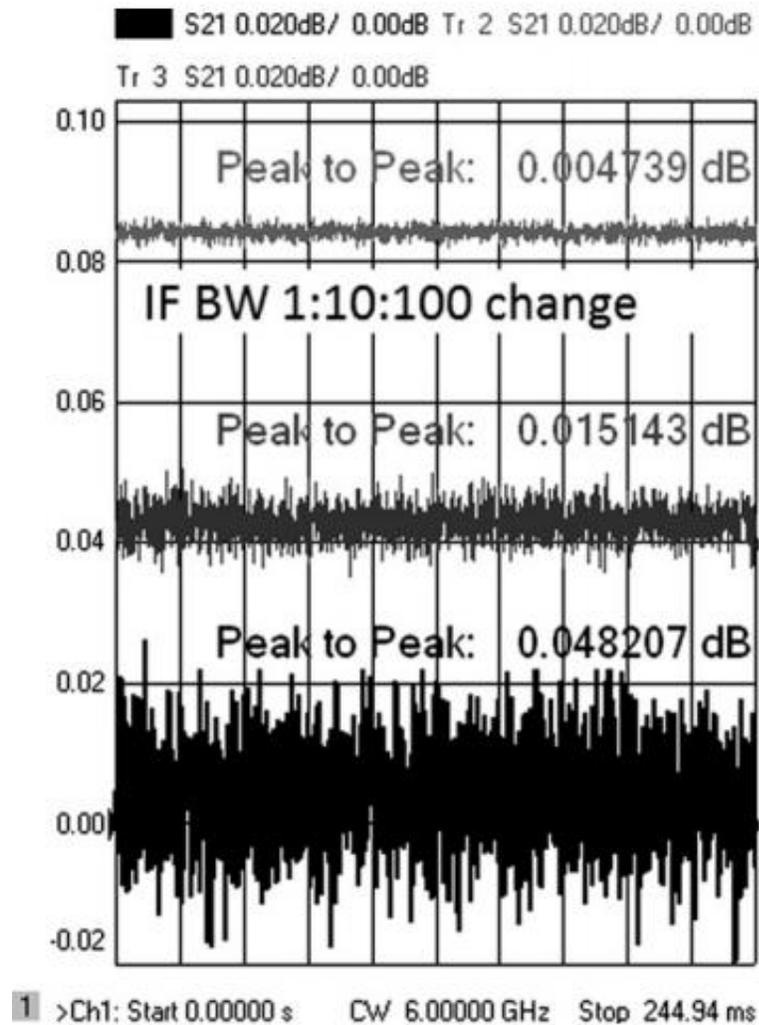
- Measurement sensitivity is limited by internal phase noise of spectrum analyzer
- Check data sheet for internal phase noise of spectrum analyzer
- Instrumentation noise always adds to measurement (error, not uncertainty)



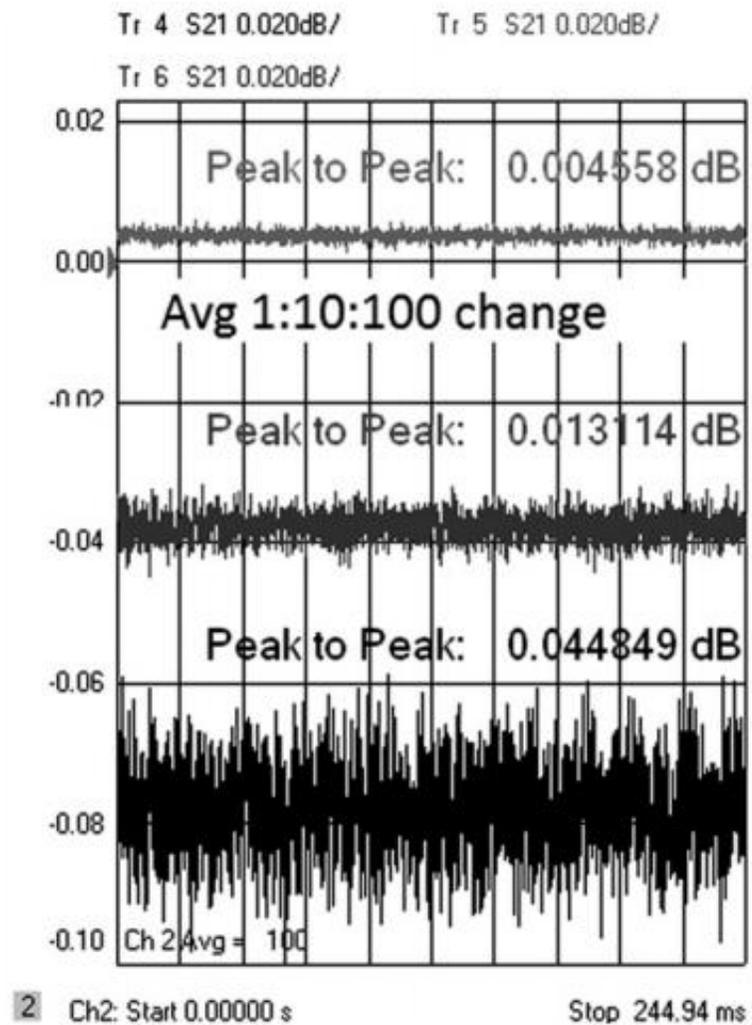
R&S FSW Spectrum Analyzer Phase Noise from Data Sheet

$L_{DUT} - L_{SA}$ (dB)	Meas Error (dB)
0	3.0
1	2.5
2	2.1
3	1.8
4	1.5
5	1.2
10	0.4
15	0.1
20	0.04

中频带宽和平均（低通滤波）的影响



IF 带宽



Average (LPF)

小结

- 1. 噪声的测试大体分为两种：**噪声系数**（噪声温度）测量和**相位噪声**测量。
- 2. 噪声系数/噪声温度是器件本身的属性，与输入信号**没有关系**。
- 3. 由于噪声功率相对比较大，发射机电路的相位噪声可以用**频谱仪直接测量**。

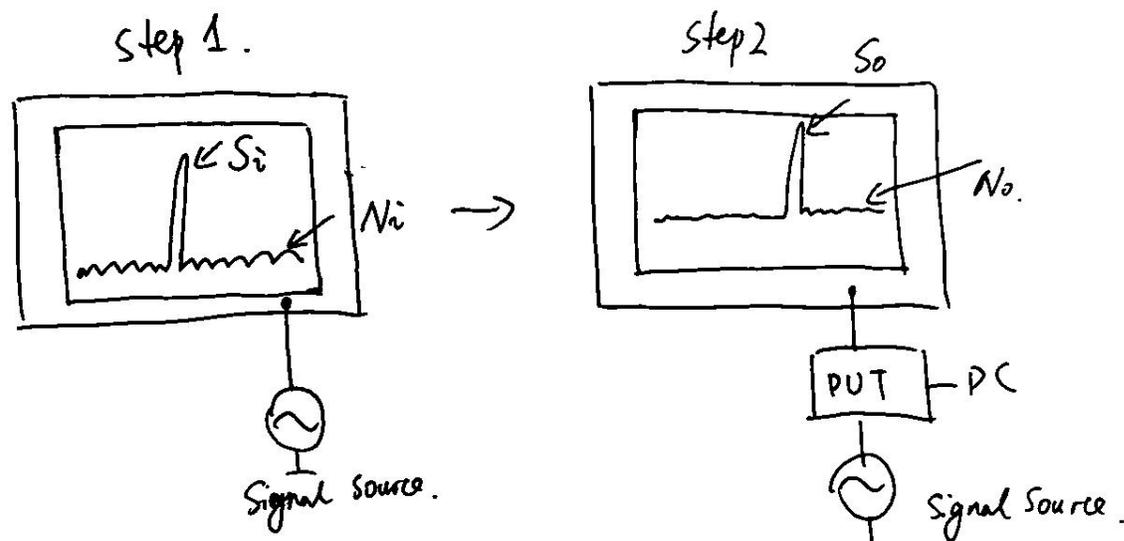
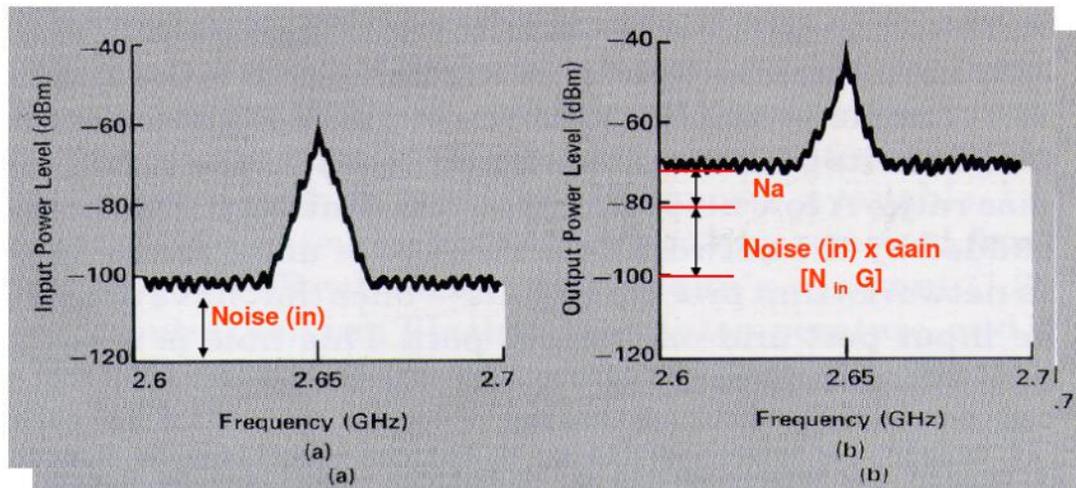
本章目录

第一节 引子，噪声的标准及噪声温度

第二节 器件和系统中的噪声

第三节 Y因子测试方法及实例

根据定义来测试噪声系数



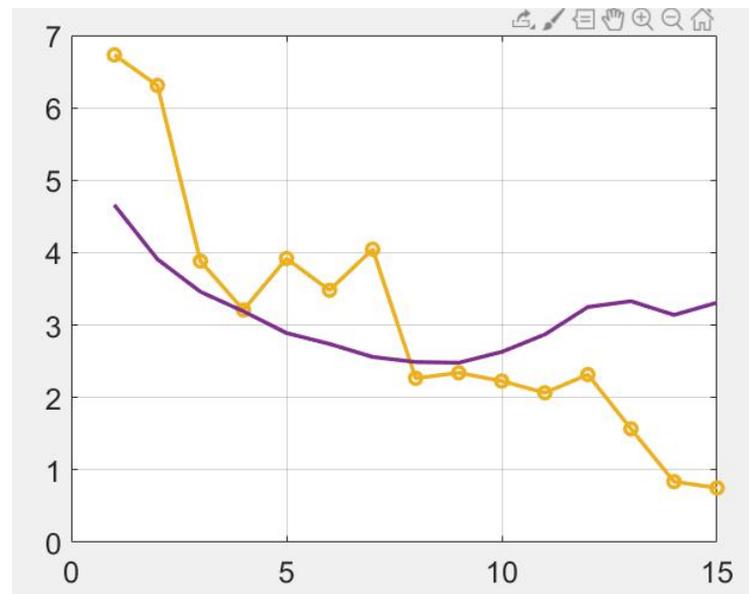
$$NF = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

该测试方法的问题

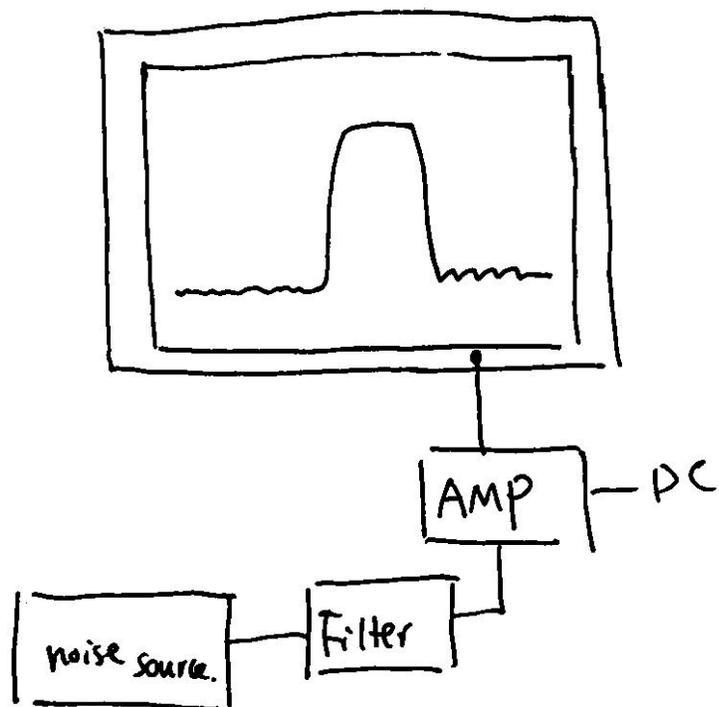
噪声功率测试不准!

思路1.对VNA噪声功率进行测量, 并校准?

思路2.增加输入噪声的功率?



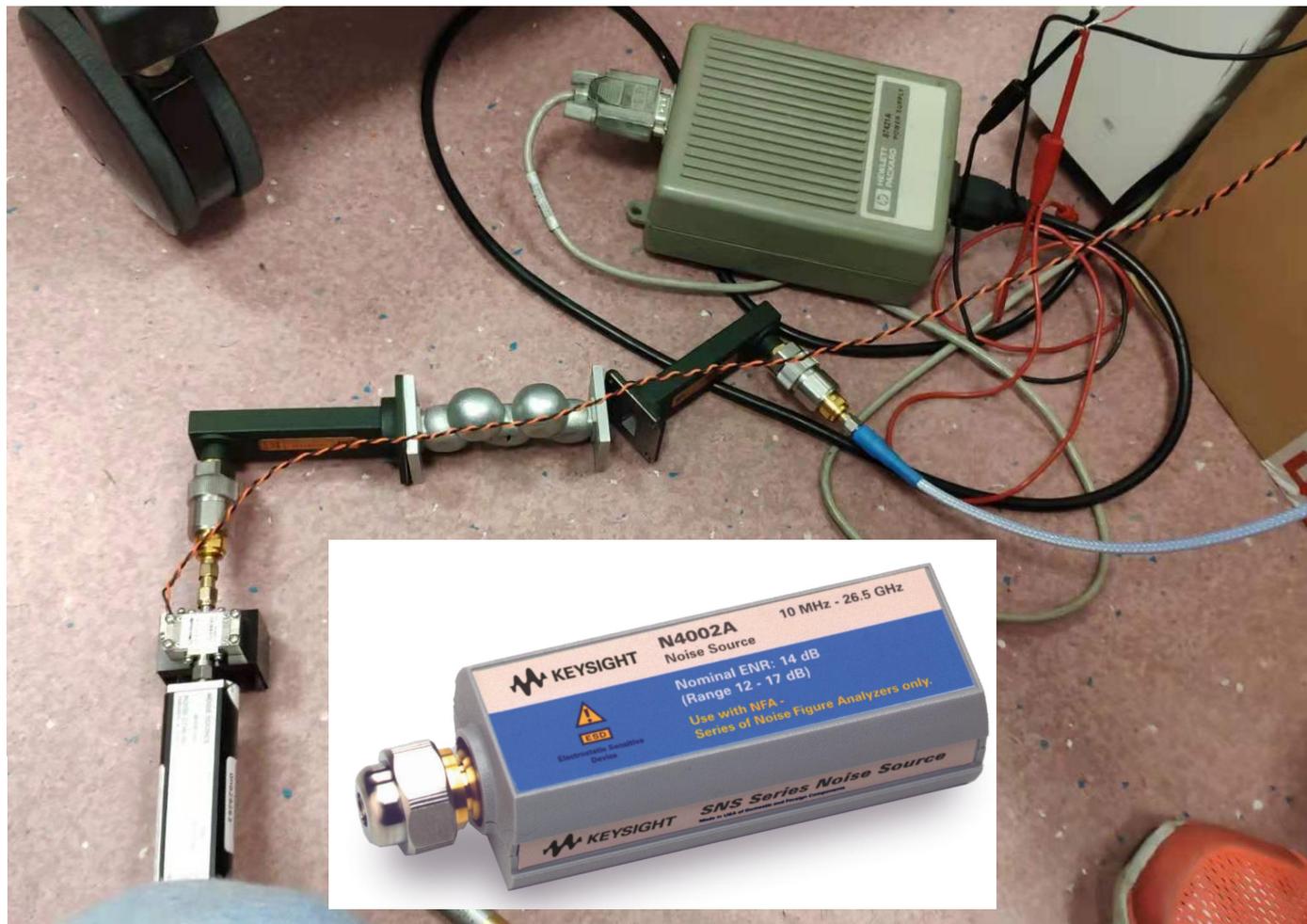
例：噪声源



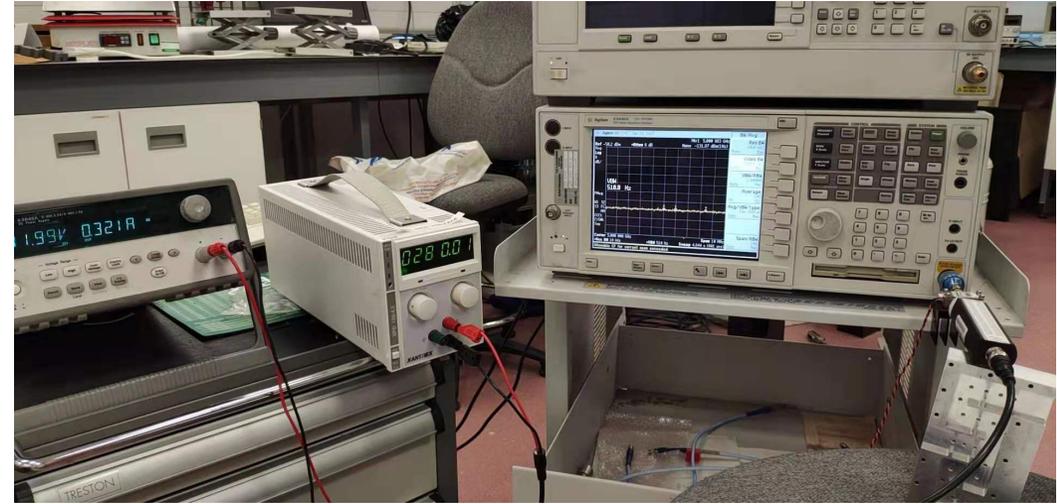
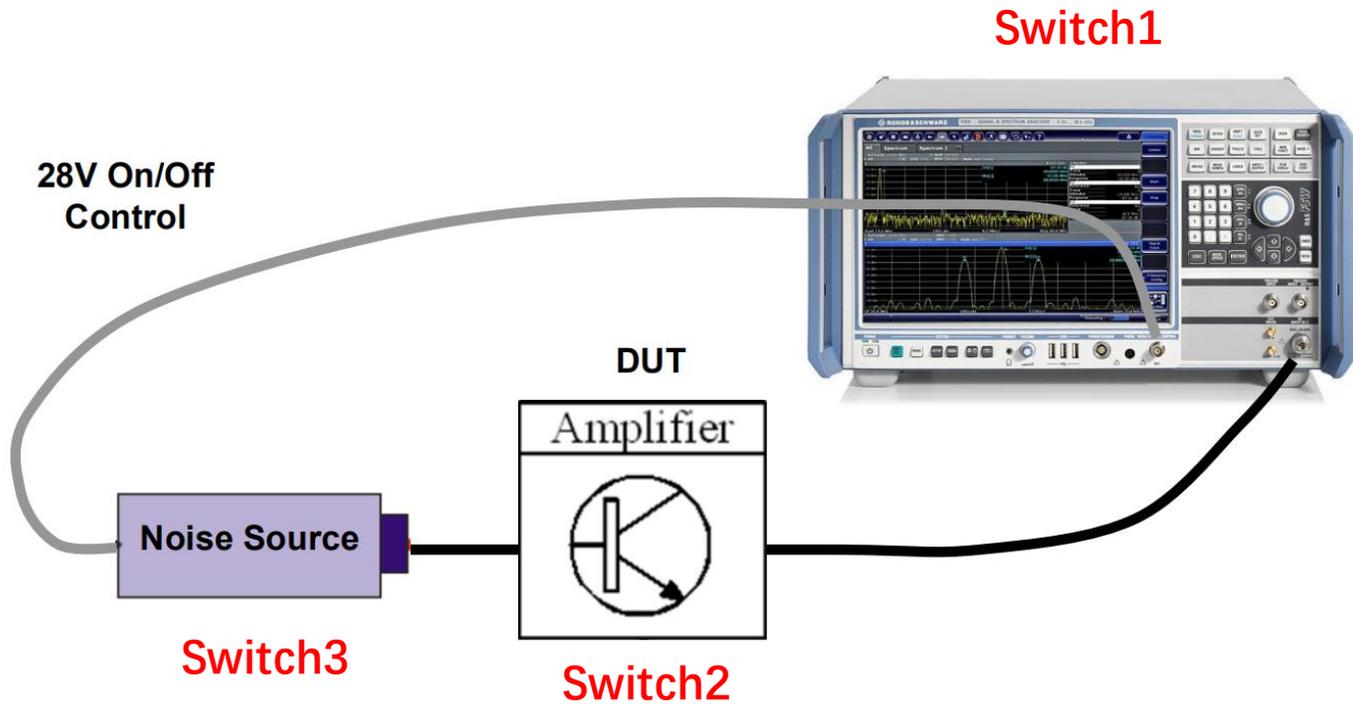
Excess Noise Ratio超噪比:

$$ENR_{dB} = 10 \log \left(\frac{T_{source}^{ON} - T_{source}^{OFF}}{T_0} \right)$$

例：ENR=10, $T_{source\ on}=290*11=3190K$
 $T_{source\ off}=290K$



Y因子测试：利用噪声测试噪声

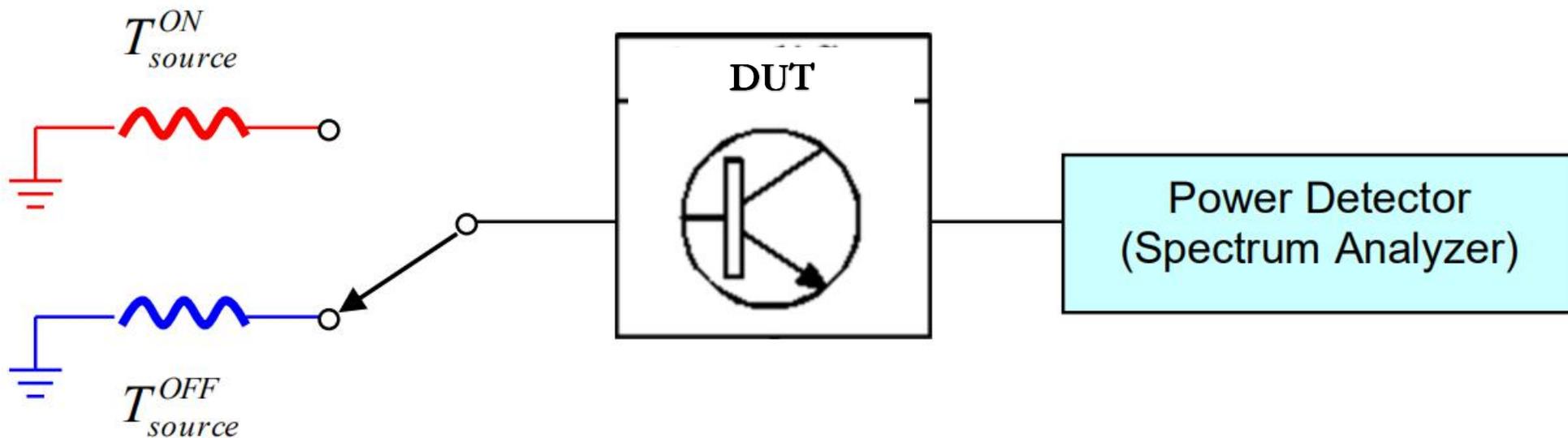
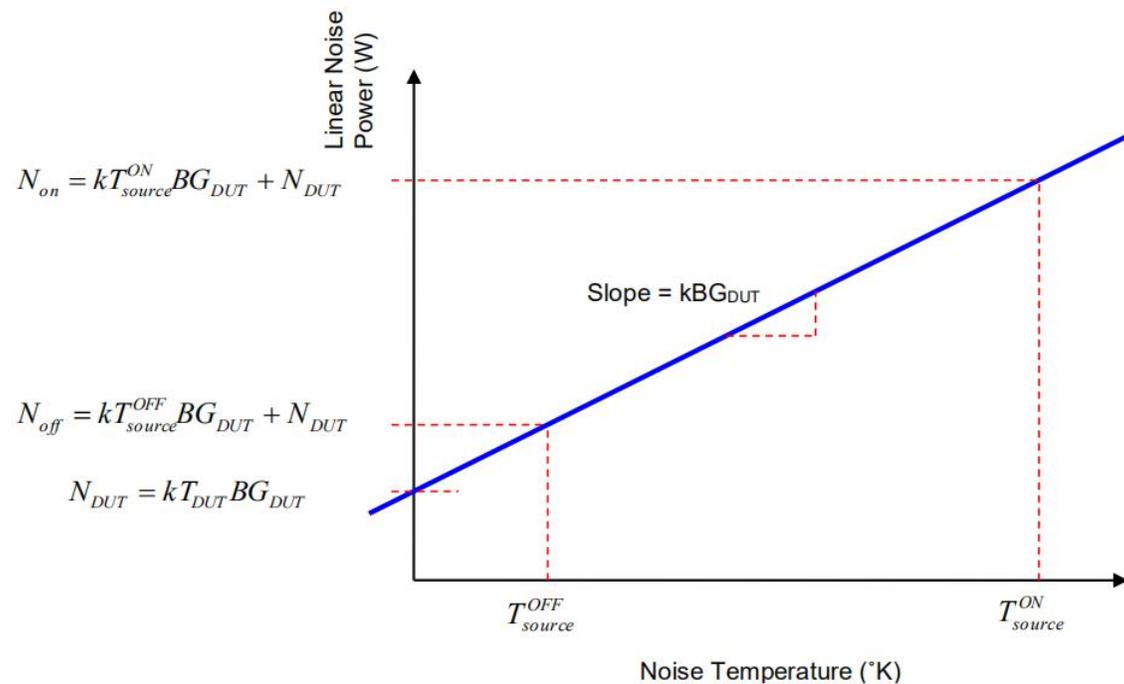


两个方程
两个未知数
需要两个标准 (冷热噪声标准)

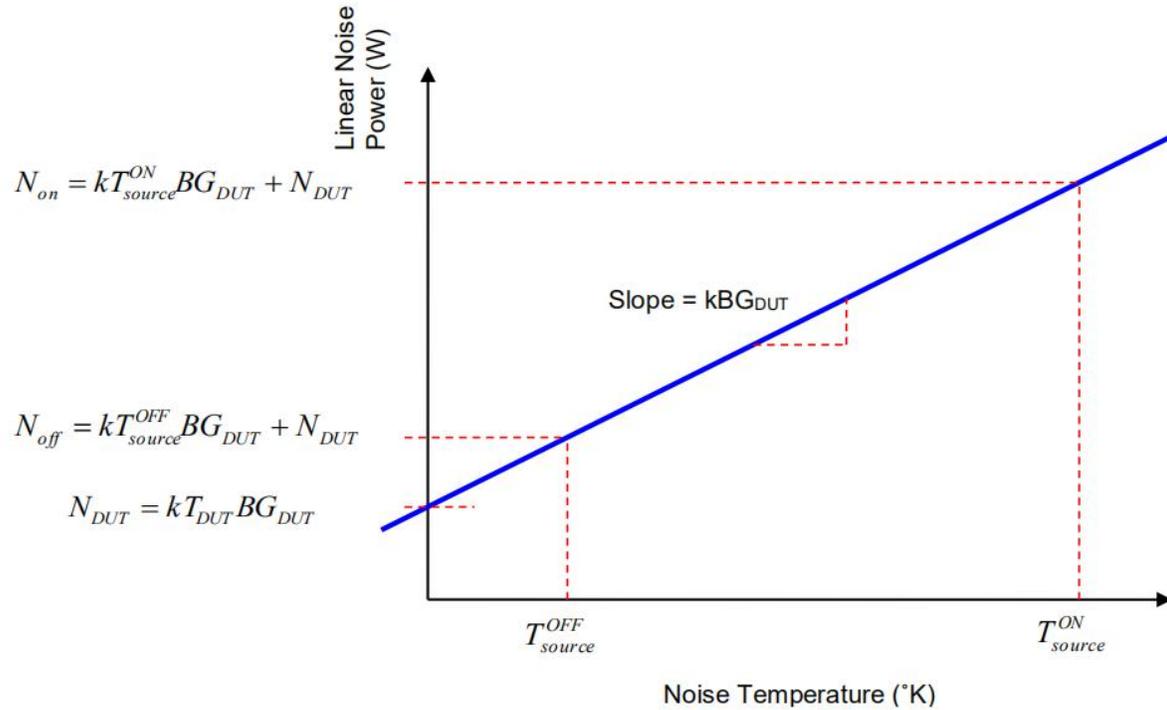


用ENR>10dB的噪声源取代信号源

1. 带宽非常宽 (白噪声)
2. 输出噪声功率稳定, 不随频率变化
3. 无需机械切换



无校准状态的Y因子测试

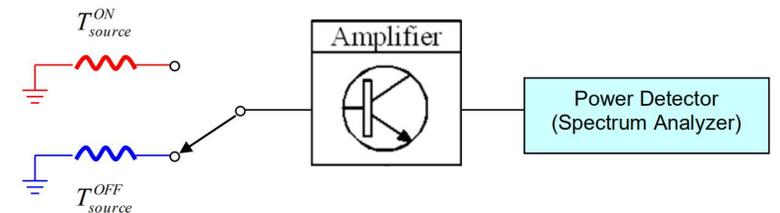


The Y factor term can be found by taking the ratio of the measured (linear) noise power at the DUT output when the noise source is on and off.

$$Y = \frac{N_{on}}{N_{off}} \quad (11)$$

$$T = \frac{T_{source}^{ON} - Y \cdot T_{source}^{OFF}}{Y - 1}$$

$$F_{dB} = ENR_{dB} - 10 \log(Y - 1)$$



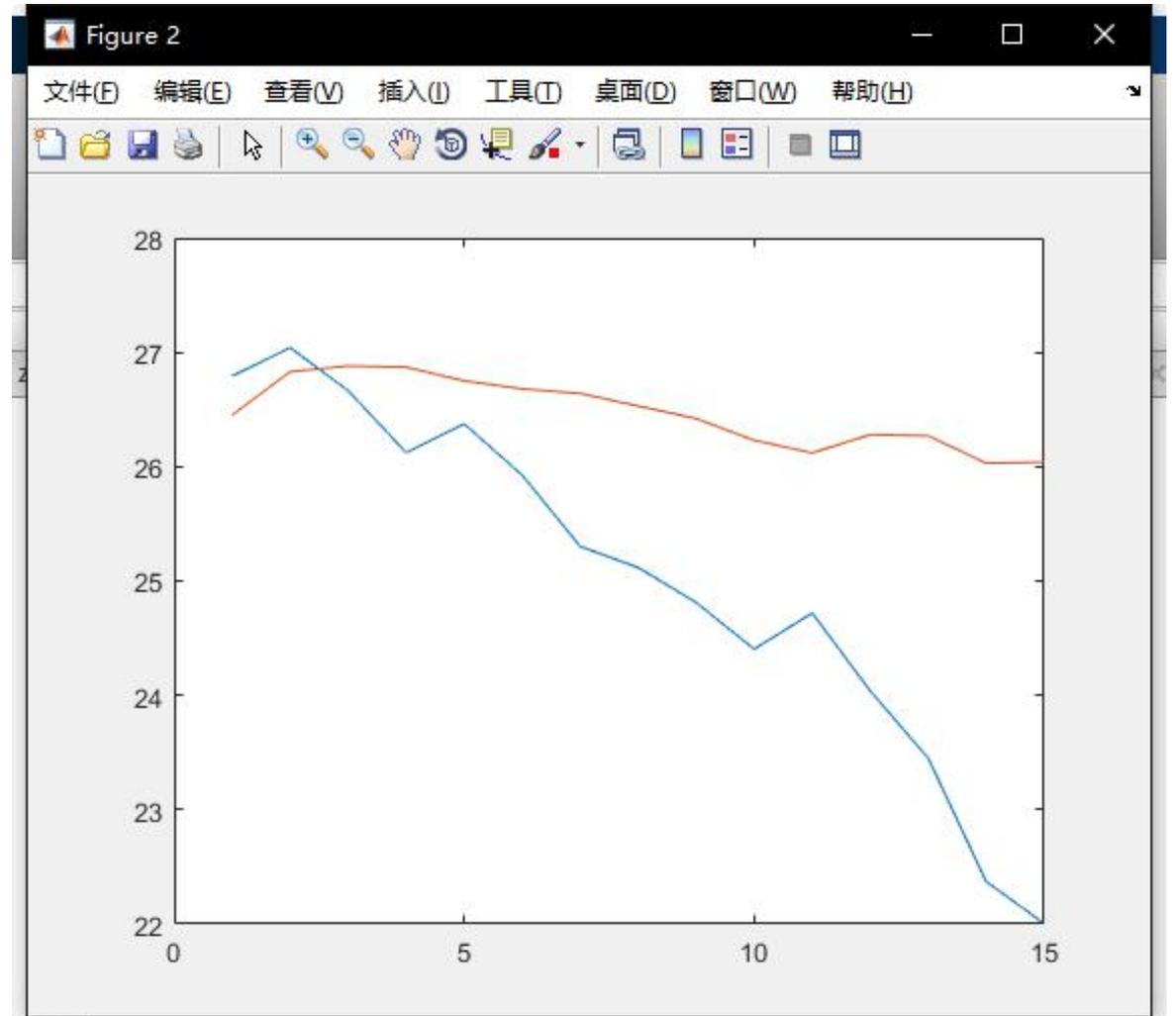
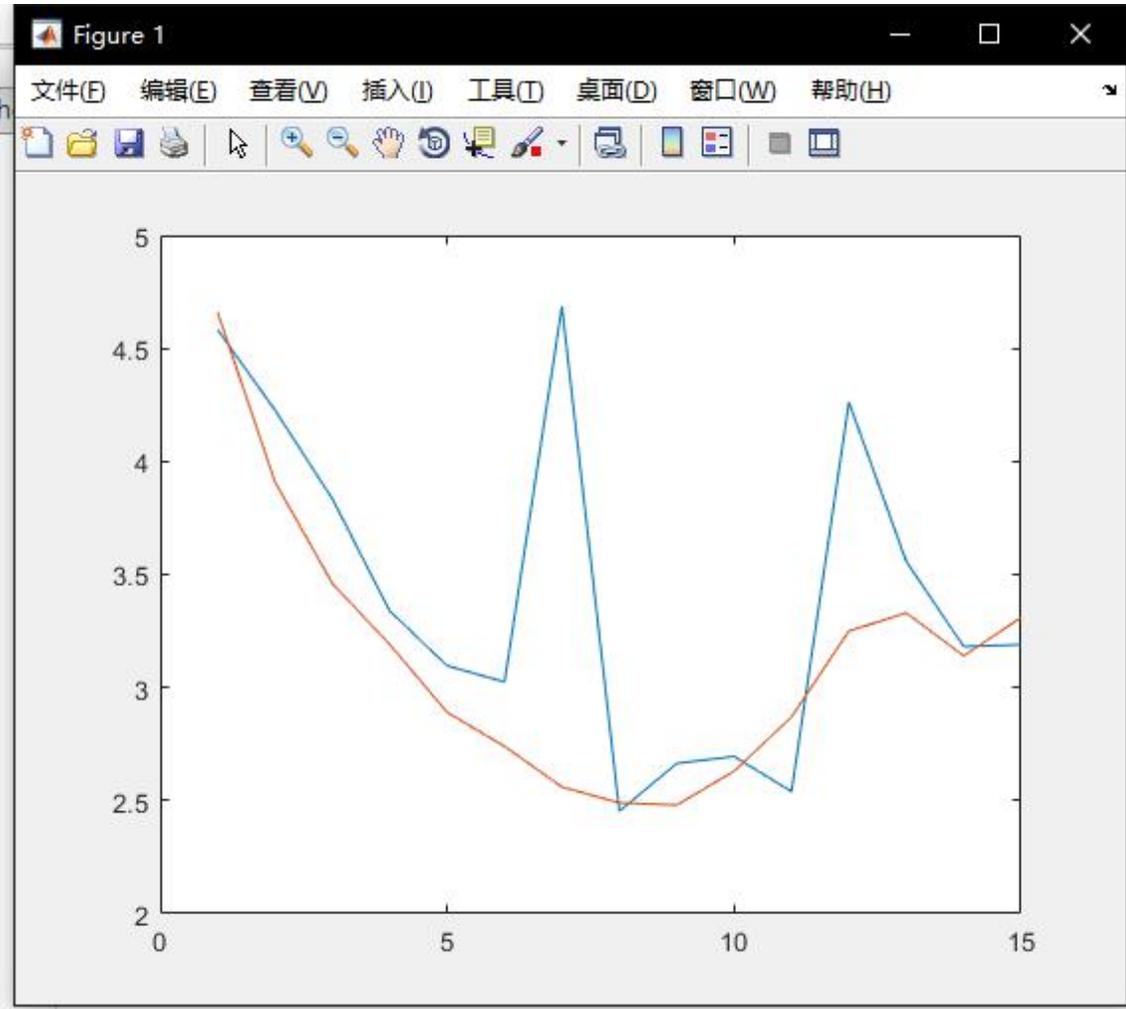
该测试方法的问题

1. 如果DUT增益够大，噪声系数基本能测试准确
2. 增益测试不准（斜率不准），测试的实际上是DUT和VNA的增益

$$G_{DUT} = G_{SA\&DUT} - G_{SA}$$

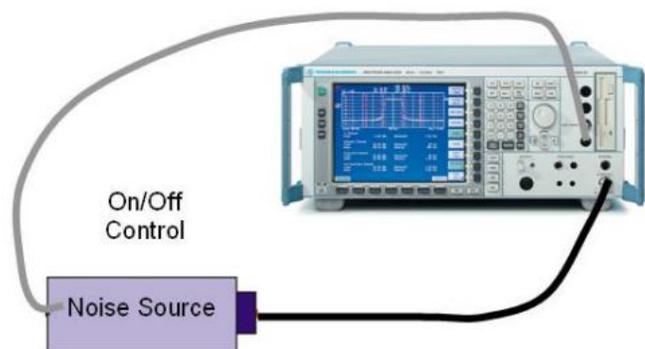
$$T_{DUT} = T_{DUT\&SA} - \frac{T_{SA}}{G_{DUT}}$$

```
N_ana=[-148.71, -148.25, -145.34, -145.19, -146.5, -146.26, -146.16, -145.11, -145.39, -145.51, -144.91, -144.45, -143.68, -142.1, -141.96];  
N_cold=[-141.65, -141.64, -141.3, -141.83, -142.38, -142.59, -141.93, -142.7, -142.9, -143.13, -142.71, -142.01, -142.01, -141.19, -141.14];  
N_hot=[-131.24, -131.25, -131.77, -132.47, -132.52, -132.89, -133.51, -133.67, -133.84, -134.12, -133.66, -133.73, -134.2, -134.81, -135.1];  
ENR=[15.53, 15.27, 15.03, 14.85, 14.61, 14.67, 14.49, 14.61, 14.75, 14.87, 15.02, 15.51, 15.54, 15.66, 15.63];
```

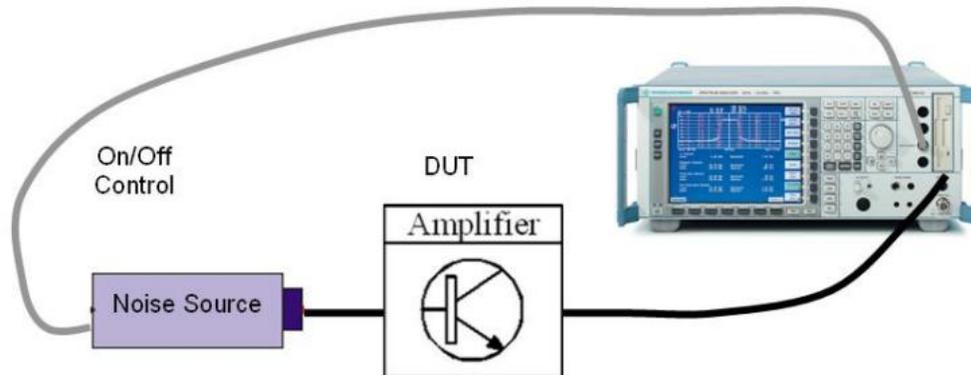


Y因子测试的校准

Calibration

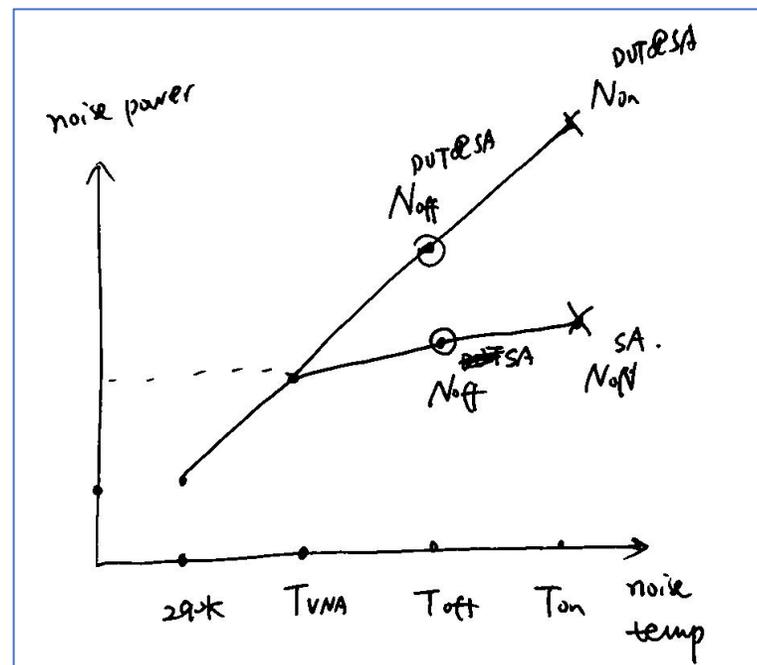


Measurement

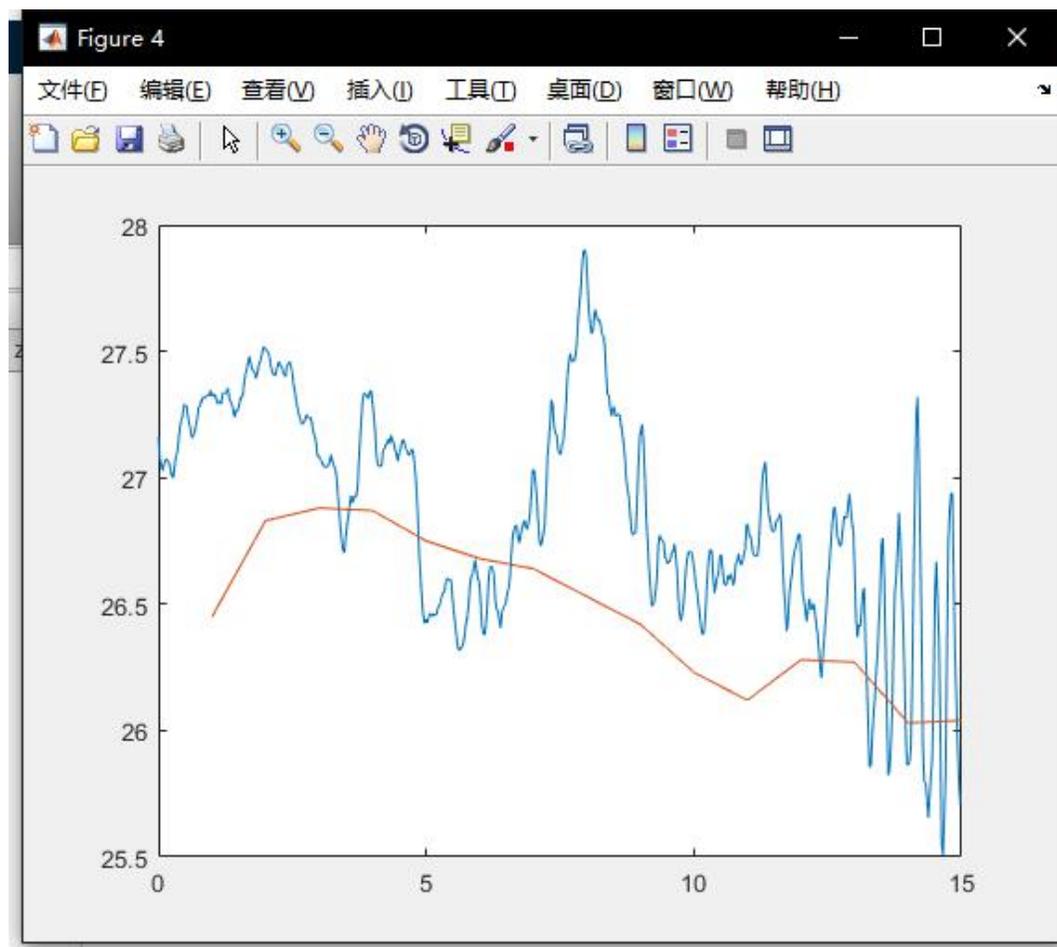
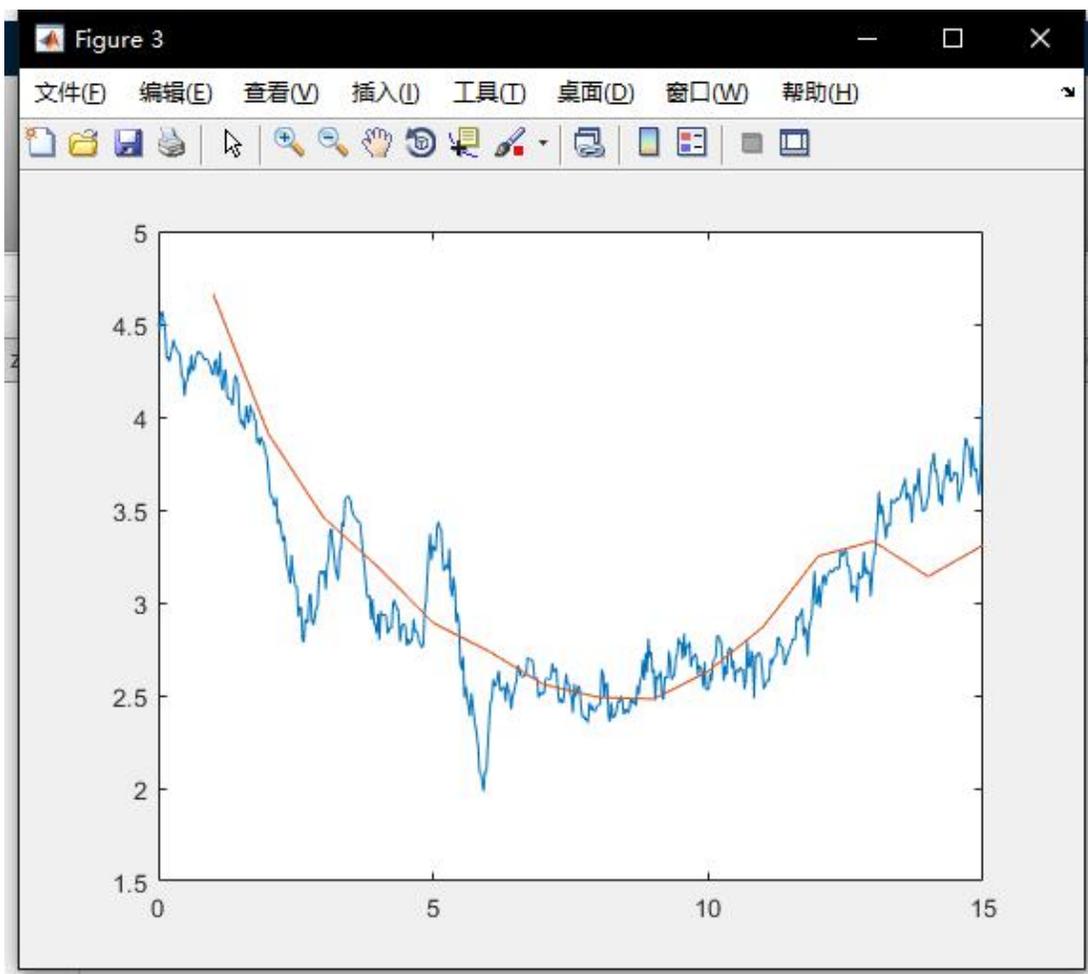


$$G_{DUT} = \frac{N_{on}^{DUT\&SA} - N_{off}^{DUT\&SA}}{N_{on}^{SA} - N_{off}^{SA}}$$

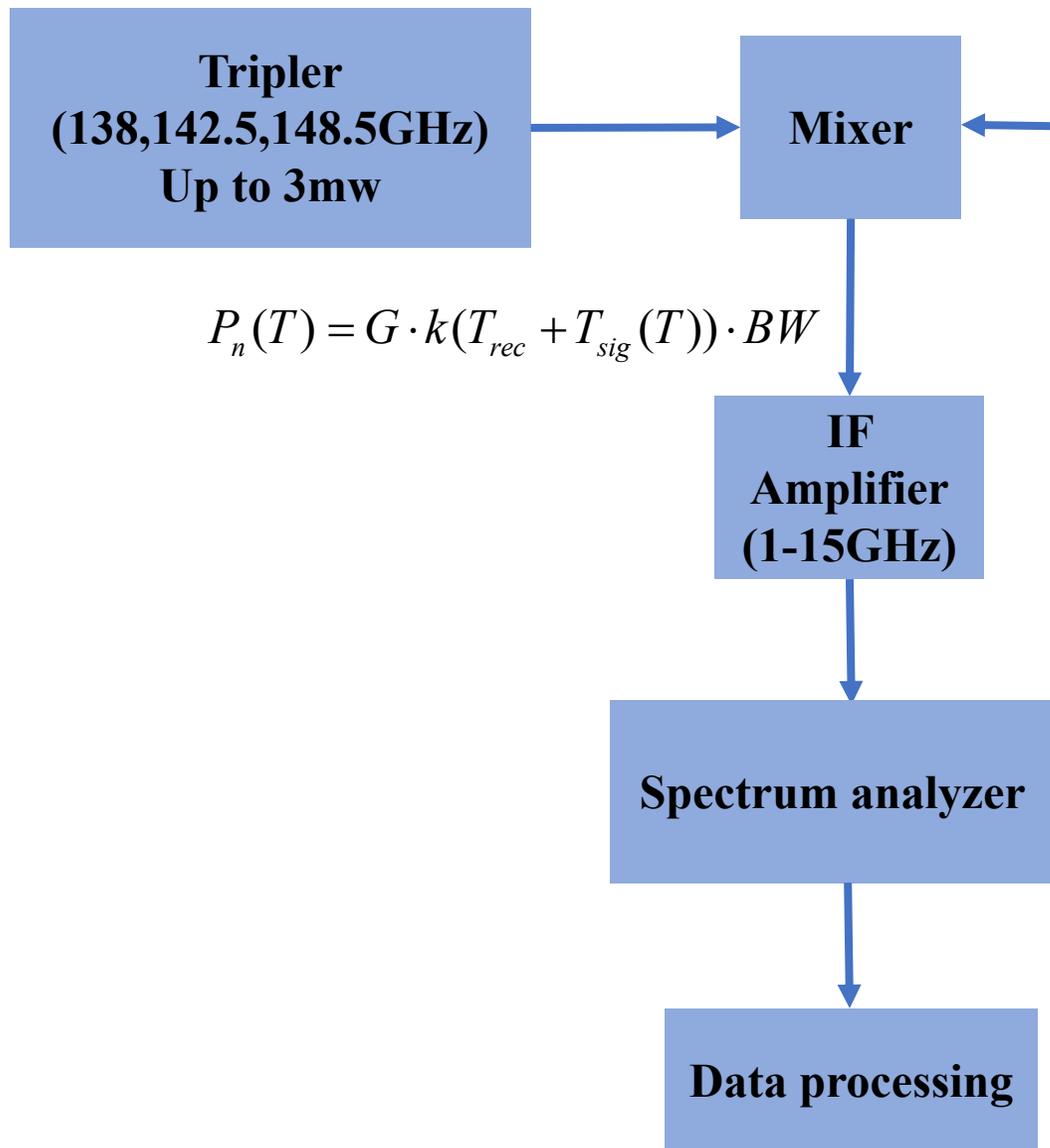
$$T_{DUT} = T_{DUT\&SA} - \frac{T_{SA}}{G_{DUT}}$$



经校准后的测试结果



实例：太赫兹混频器的Y因子测试



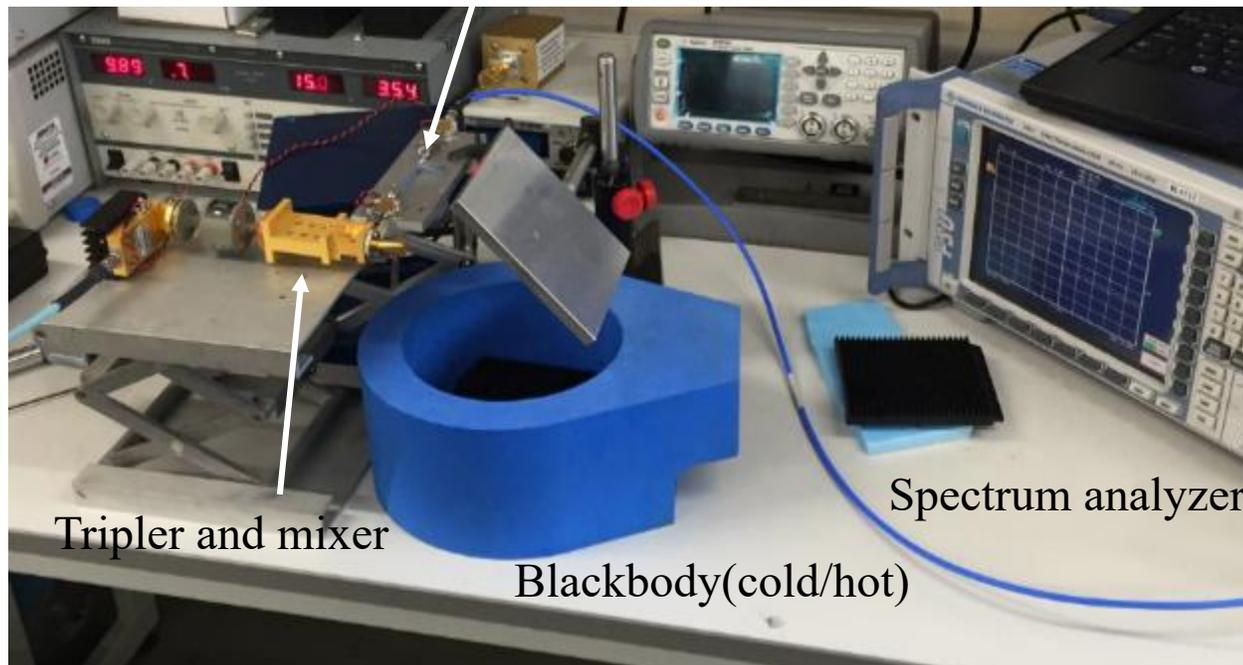
$$P_n(T_{hot}) = G \cdot k(T_{rec} + T_{sig}(T_{hot})) \cdot BW$$

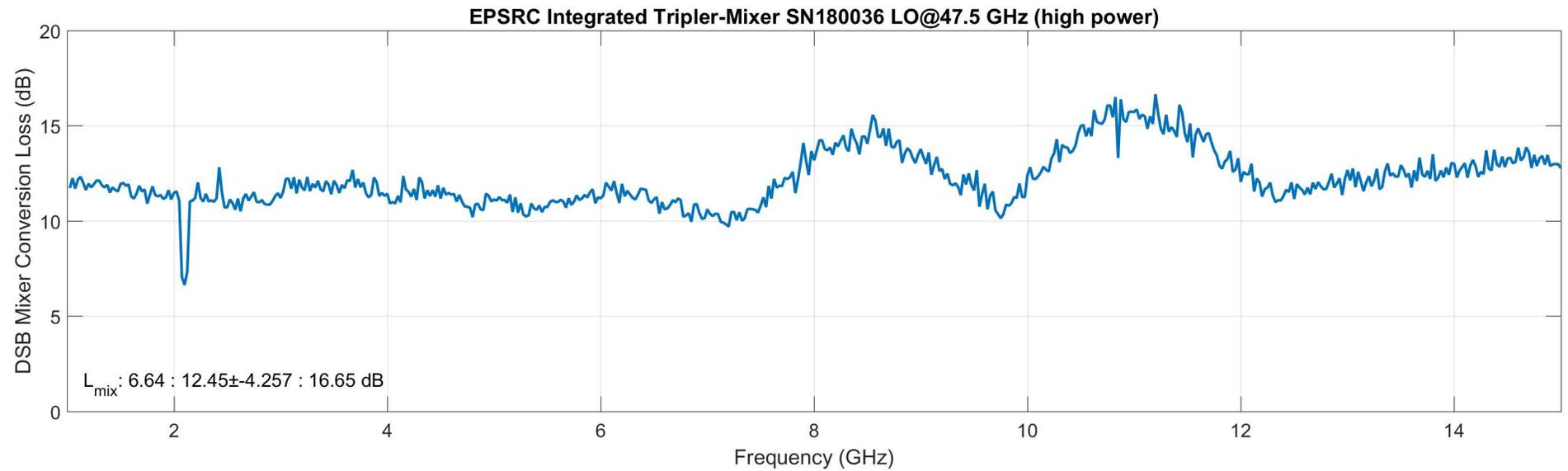
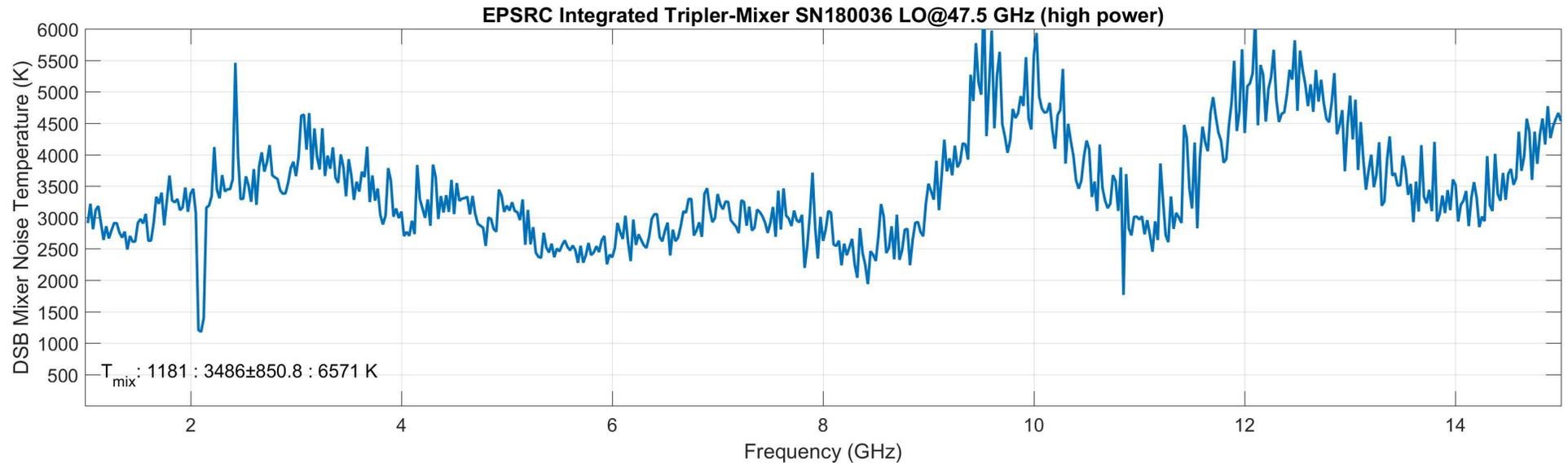
$$P_n(T_{cold}) = G \cdot k(T_{rec} + T_{sig}(T_{cold})) \cdot BW$$

$$Y = P_n(T_{hot}) / P_n(T_{cold})$$

$$T_{rec} = (T_{hot} - Y \cdot T_{cold}) / (Y - 1)$$

IF amplifier (1-15G)





小结

- 1. Y因子法可以用于测量DUT的增益和噪声温度（噪声系数）。
- 2. Y因子法测试的标准同样是温度。
- 3. 使用Y因子法测试DUT的增益一般需要（对频谱仪进行）校准。

- 1. 根据提供的资料，描述利用传输线法和谐振腔法测试介电材料特性的原理和过程（2-3人）
- 2. 通过查找文献，描述利用Y因子法测试低噪声放大器NF和增益的过程并推导相关公式（2-3人）
- 3. 通过查找相关资料，描述利用噪声源测试无源器件，如滤波器的原理和过程（1-2人）
- 4. 通过查找相关资料，描述噪声源的原理和电路结构（2-3人）