



射频电路测试原理

第十二讲 典型射频芯片测试介绍与 测量仪器的程控(GPIB)

leiyh@mail.tsinghua.edu.cn



参考文献

- 参考：王子宇译，《射频电路设计--理论与应用》，电子工业出版社，2002
- 参考：张之超等译，《无线通信设备与系统设计大全》，人民邮电出版社，2004
- 84000 Product Overview_5965-5272E.pdf
- RF_TestOfWLAN_china.pdf
- 典型射频芯片举例：MAX2644 (LNA)、MAX2247 (PA)、MAX9996 (Downconversion Mixer)、MAX2660-MAX2673 (Upconverters Mixer)、MAX2750-MAX2752 (VCO)、MAX2452 (I/Q Modulator)
- ..\82350A_GPIB_PCI_Card\Measurement Automation_5988-5591EN.pdf
- ..\82350A_GPIB_PCI_Card\Data Sheet_5966-2720E.pdf ..\82350A_GPIB_PCI_Card\Agilent VISA User's Guide_5188-5722.pdf
- ..\82350A_GPIB_PCI_Card\Agilent SIDL User's Guide for Windows_E2094-90038.pdf



内容

12.1 射频集成电路测试基本问题

12.2 滤波器主要技术指标及其测试方案

12.3 低噪声放大器主要技术指标及其测试方案

12.4 功率放大器主要技术指标及其测试方案

12.5 振荡器主要技术指标及其测试方案

12.6 混频器主要技术指标及其测试方案

12.7 调制解调器主要技术指标及其测试方案

12.8 电子测量自动化

12.9 GPIB总线标准

12.10 VXI总线系统简介

12.11 ATE自动测试系统

第六次实验 典型射频芯片测试

第十二讲 典型射频芯片测试介绍与测量仪器的程控
(GPIB)小结

12.1 射频集成电路测试基本问题

- **配置测试系统**：PF、LNA、PA、Mixer、VCO、Modulators and demodulators，工作频率为 800 MHz to 900 MHz，1.9 GHz and 2.4 GHz，或高于2.4 GHz；
- **RFIC性能测试**：器件增益/损耗、S参数（增益/损耗、隔离、匹配、VSWR）、功率（邻道功率和效率）、增益压缩、混频器转换增益、混频器泄漏、网络噪声系数、N阶内调制（交调和互调）、振荡器相位噪声、谐波失真（SOI和TOI）、IQ调制压缩、隔离、寄生信号、功耗、VSWR和EVM等。
- **无线系统测试**：例如：WLAN（无线局域网）。
 - **无线局域网的两大标准**：IEEE802.11和 ETSI HIPERLAN；
 - 标准中采用了不同的调制技术，例如：FSK、MSK、GMSK和OFDM等调制技术；
 - 无线局域网的射频物理层，包括时域、频域和调制域的分析 and 调试。

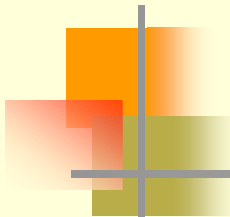
无线局域网的标准

无线局域网标准一览表

	无线局域网标准				
	802.11	802.11b	802.11a	一类 HIPERLAN	二类 HIPERLAN
频率段	2.4GHz	2.4GHz	5GHz	5GHz	5GHz
信道间隔	DSSS: 25MHz FHSS: 1MHz	25MHz	20MHz	23.5MHz	20MHz
最高数据率	2Mbps	11Mbps	54Mbps	23.5Mbps	54Mbps
载波类型	FHSS 或 DSSS	DSSS	OFDM	单载波	OFDM
调制	GFSK (FHSS) DBPSK 或 DQPSK (DSSS)	CCK 16QAM, 或 64QAM	BPSK & QPSK, 16QAM, 或 64QAM	FSK 或 GMSK	BPSK & QPSK,
每信道 载波数量	79 ²	1(DSSS)	数据:48,导频:4	1	数据:48,导频:4
最大 输出功率	30dBm	30dBm	35dBm ¹	30dBm ¹	30dBm ¹

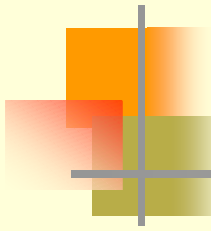
注释1: 有效全向辐射功率(EIRP)

注释2: 美国的信道数目



安捷伦新闻发布

- 安捷伦新闻发布：北京，2003年4月30日
 - 威宇科技添购安捷伦84000测试系统，构建华东第一条射频电路测试生产线；
 - 威宇科技选择84000射频测试系统（ATE），原因有：
 - 首先，84000测试系统设计上容易做程序开发，完整的参数量测套件，以及优越的系统稳定性等三大优点。
 - 其次，来自于美国硅谷的多家设计公司都要求用84000测试系统来进行生产，在所能够测试的射频芯片覆盖率上，84000测试系统也明显优于其它可选方案。
 - 威宇科技（www.gaptl.com）是一家外商独资的半导体后工序企业，已在上海浦东开发区张江高科技园区建立一个完整的封装设计，组装，测试企业。



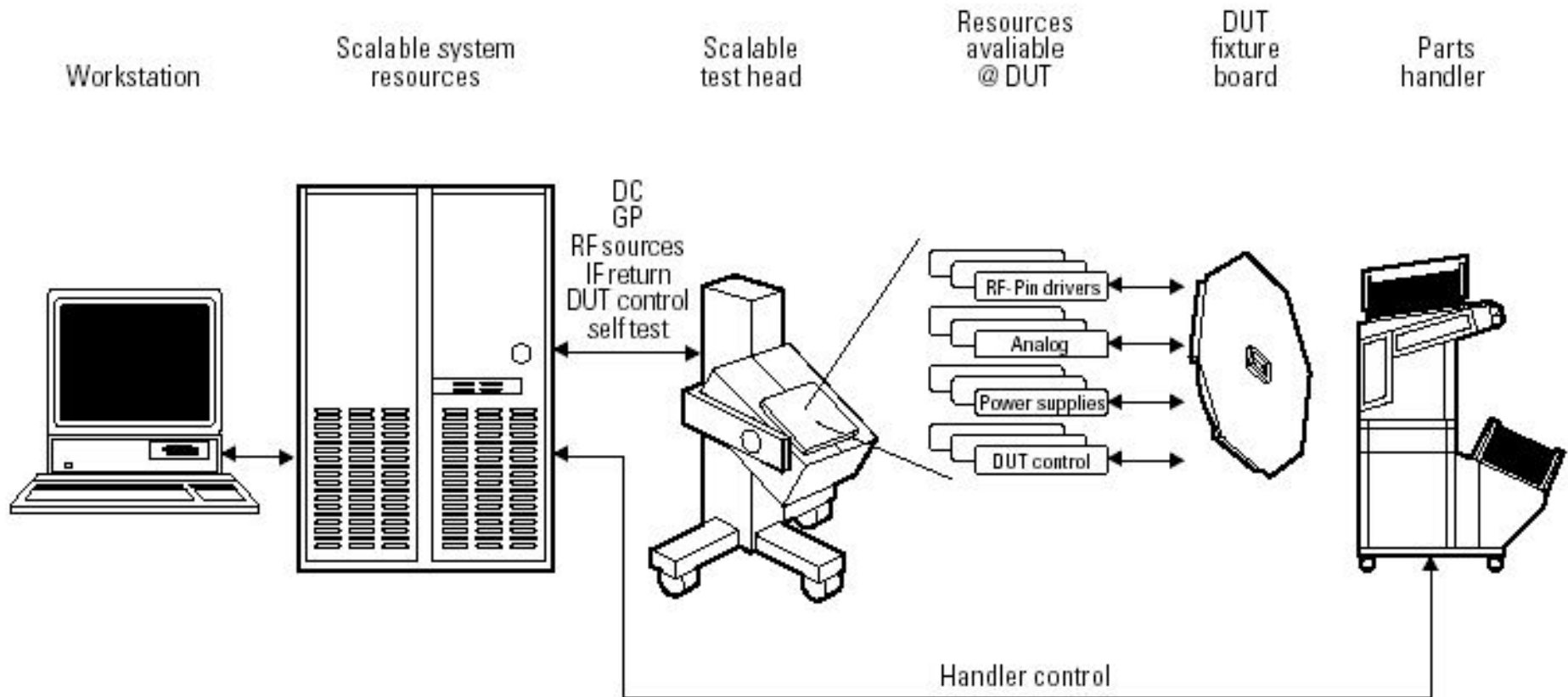
84000射频集成电路测试系统

- 安捷伦84000射频集成电路测试系统具有广泛升级空间的RFIC解决方案，具有2到12个RF测试端口，可以满足严格的市场需求，对于多功能RFIC、信号收发器、信号混合器、信号转换器（Mixer）、功率放大器（PA）和低噪声放大器（LNA）提供了完备的解决方案。
- 可以测试如噪声图、信号转换增益、双频三阶截取点、相邻信道能量隔离等多种参数。
- 同时，84000系统不需要经常地进行校准，且校准过程极为简单，易于操作，确保系统可以迅速地转产其它器件。
- 相对于标准的实验室环境，84000的比对测试结果高达98%。由于稳定的量产启动周期和迅速的器件转产能力，84000可以极大地缩短测试时间，从而缩短了产品的上市周期。

84000 RFIC Test System



84000 RFIC Series Test System



The Agilent 84000 RFIC Series is a complete test system which can include the interface to parts handlers.



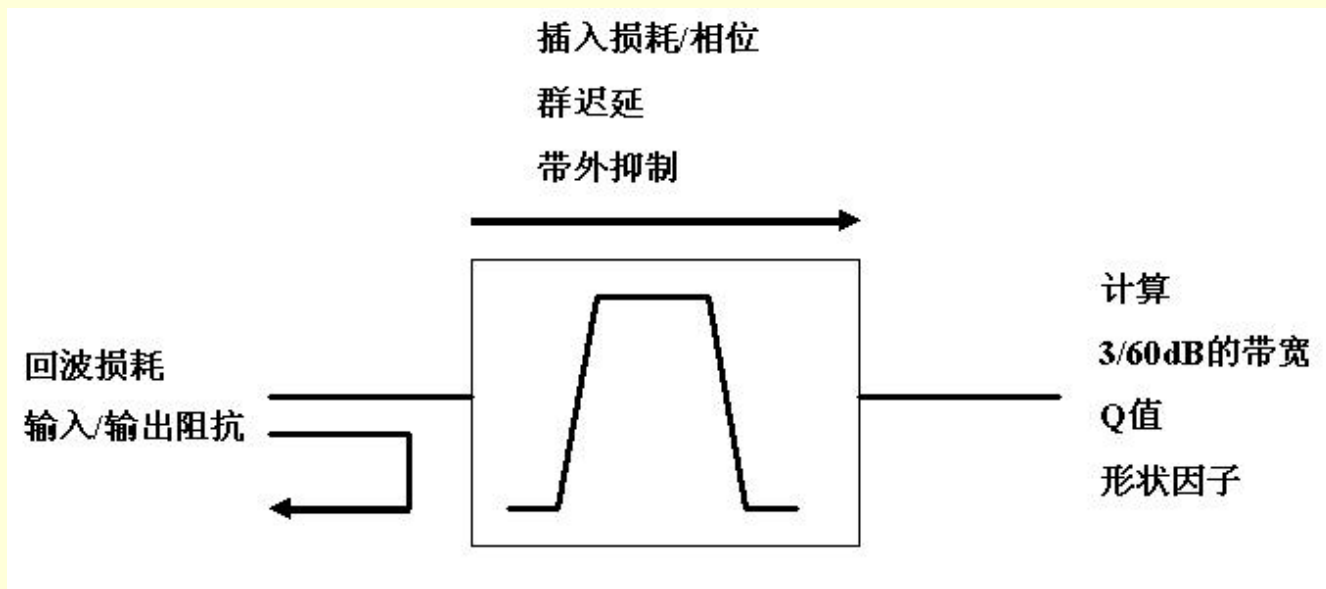
84000 测试项目

- ☐ Adjacent channel power
- ☐ AM-PM conversion (static)
- ☐ Efficiency (power added)
- ☐ Frequency, CW
- ☐ Gain or loss
 - vs control voltage or digital state
- ☐ Gain compression
 - Pout @ N dB, saturation
- ☐ Harmonic distortion
 - dBc
 - SOI, TOI
- ☐ I, Q modulator suppression
 - carrier and unwanted sideband
- ☐ Isolation
- ☐ Minimum detectable signal
- ☐ Mixer conversion gain or loss
- ☐ Mixer leakages
 - LO–RF, LO–IF, carrier feedthrough
- ☐ Noise figure
- ☐ Nth order intermodulation
 - two-tone IP2, IP3
- ☐ Phase noise
- ☐ Power (dBm)
 - output power
 - vs bias voltage
- ☐ S-parameters
 - gain/loss, isolation, match, VSWR
- ☐ Spurious signals
 - at known frequency
- ☐ Supply currents
 - enabled, sleep mode
- ☐ Voltages
- ☐ VSWR
- ☐ Error Vector Magnitude

A full compliment of RF tests are available.

12.2 滤波器主要技术指标及其测试方案

- 滤波器有三个方面的测量参数：
 - (1) 传输参数（插入损耗/相位、群延迟、带外抑制）；
 - (2) 反射参数（回波损耗、输入/输出阻抗）；
 - (3) 计算（3/60dB的带宽、Q值和形状因子）。





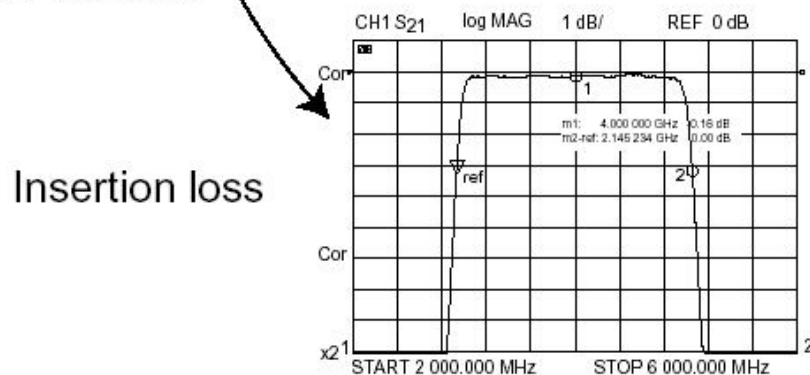
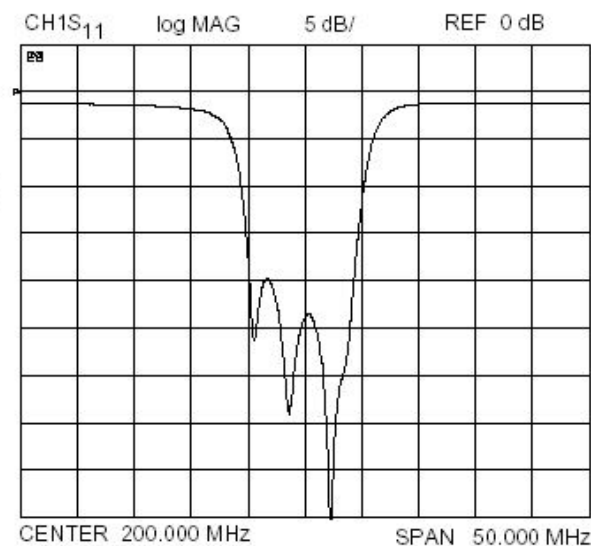
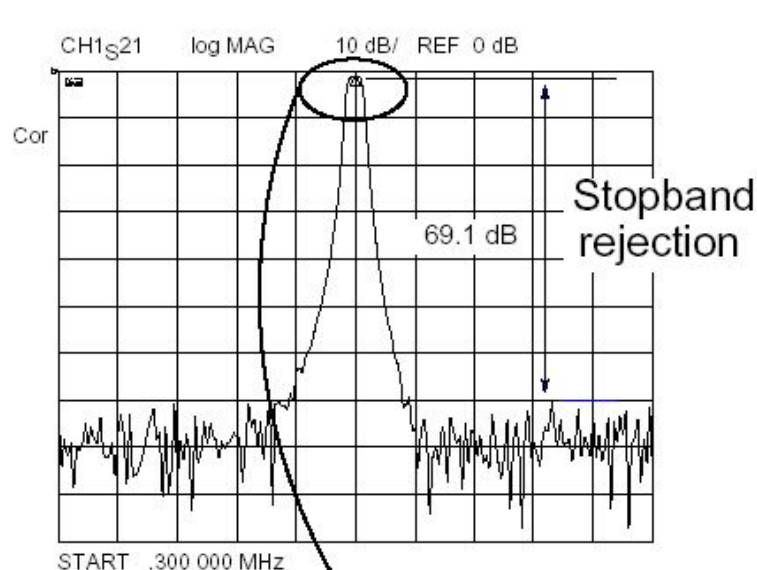
通信中常用滤波器主要类型

- 升余弦滤波器 (Raised cosine filter)
- 平方根升余弦滤波器 (Square-root raised cosine filter)
- 高斯滤波器 (Gaussian filter)
- IS-95 Filters
- EDGE Filter
- EDGE (winRC) Filter

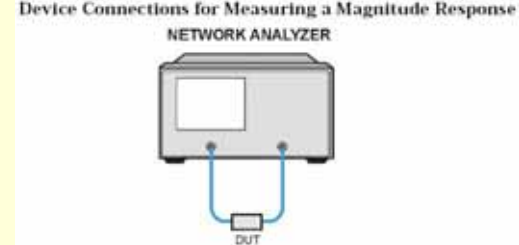


利用VNA进行滤波器测试

- 滤波器扫描测试举例：
- 传输响应和反射响应。



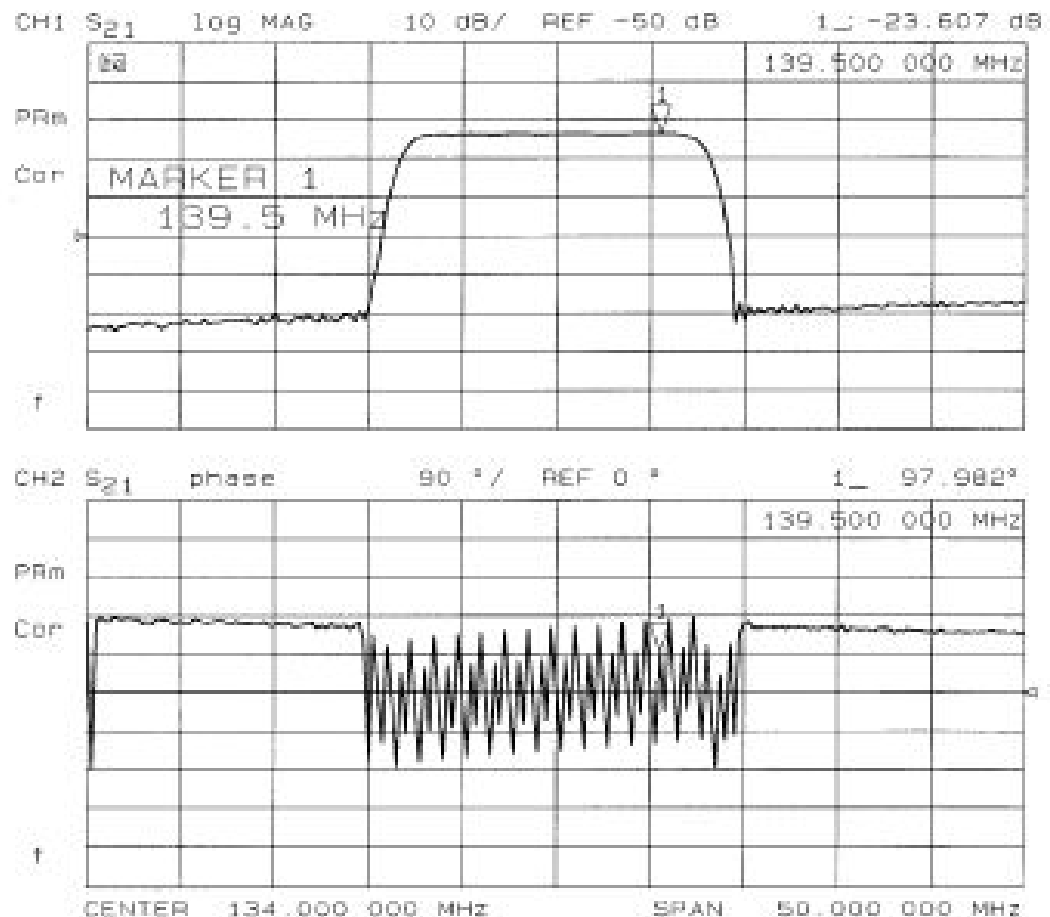
Testing Filters with Frequency Sweeps



利用VNA进行滤波器测试（续1）

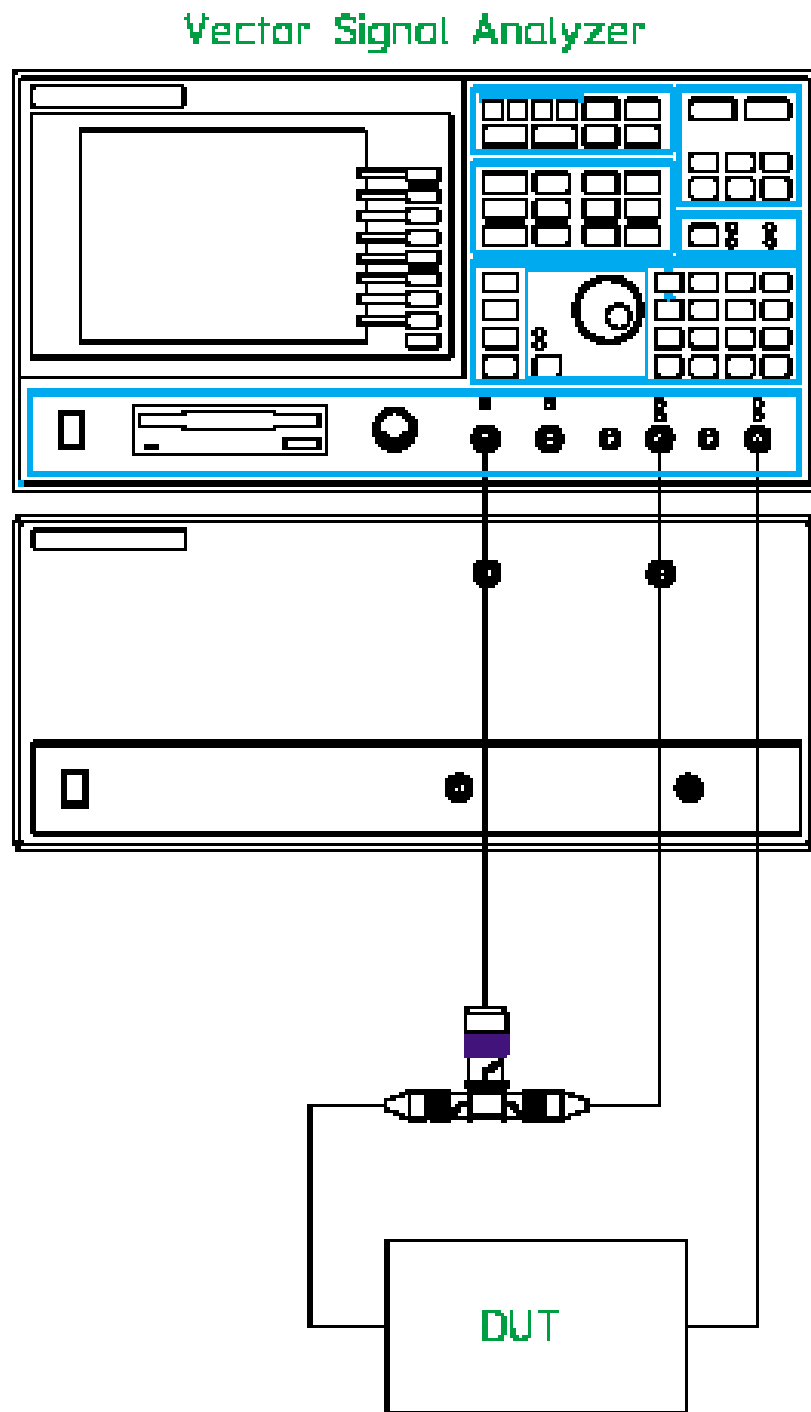
Example Insertion Phase Response Measurement

- SAW滤波器测试举例：
- 测量幅度响应和插入相位响应。



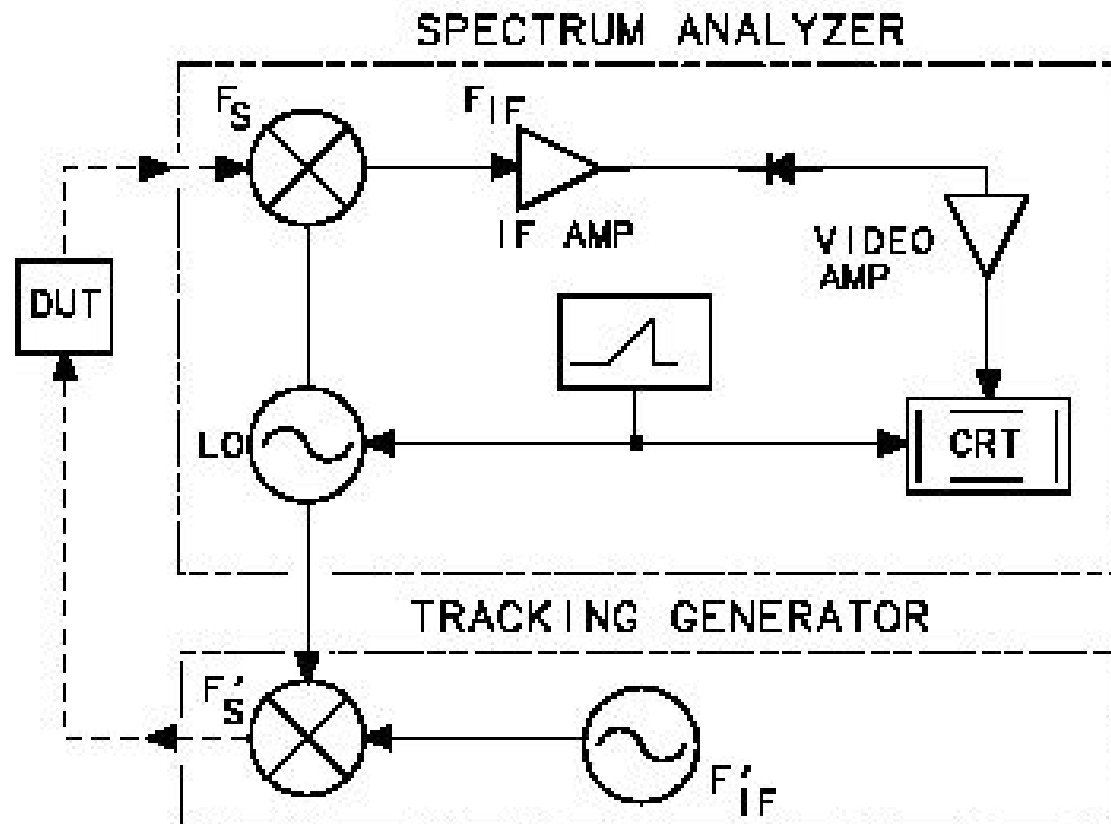
利用VSA进行滤波器的频率响应测量

- 设置4.5MHz带通滤波器的频率响应测量：
 - 直接连接SOURCE到通道1的输入；
 - 滤波器的输出接到通道2的输入。



利用频谱分析仪进行激励-响应测量

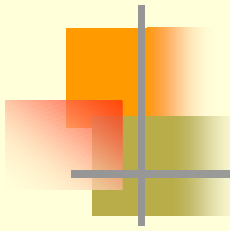
Block Diagram of a Spectrum Analyzer and Tracking Generator System





12.3 低噪声放大器主要技术指标 及其测试方案

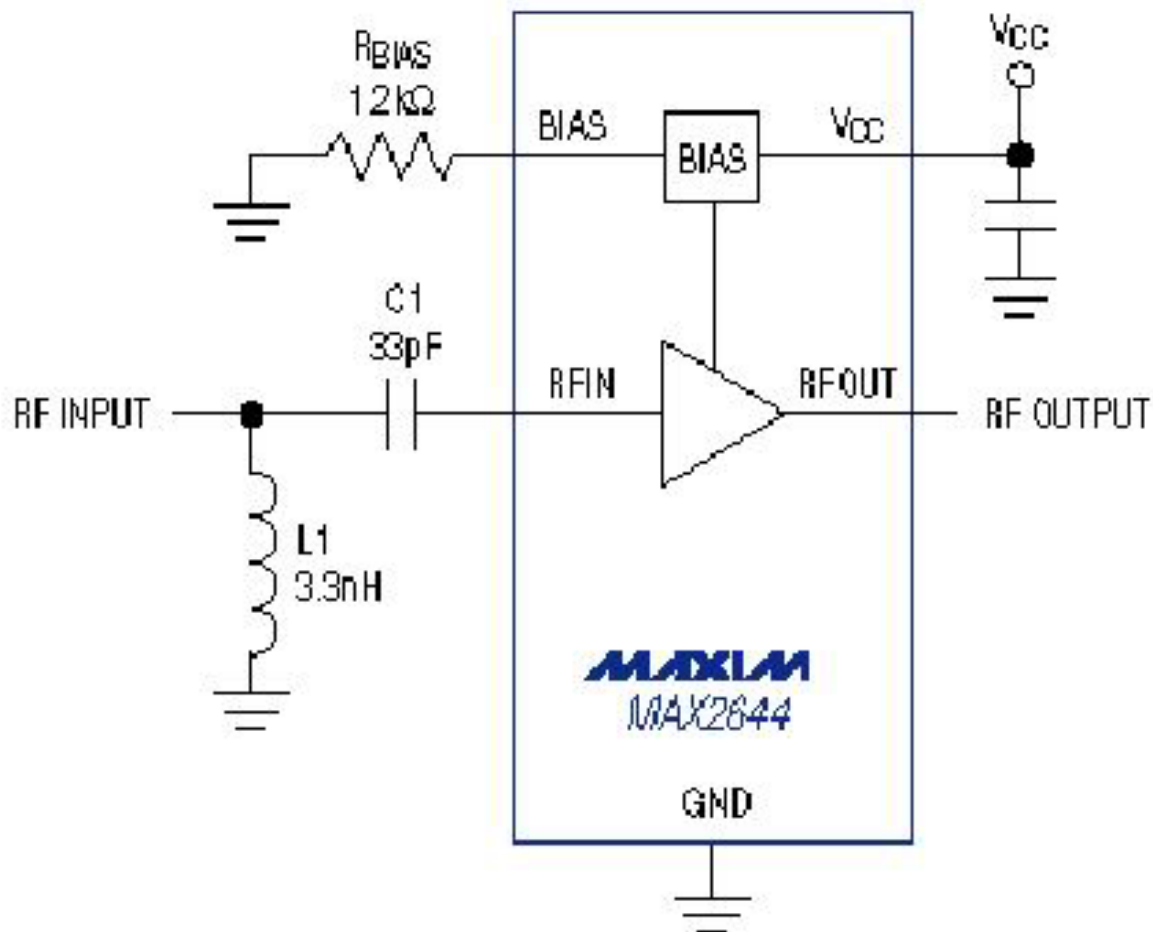
- RF S-Parameters
- Noise Figure
- Gain
- IIP3
- $P_{1\text{dB}}$



MAX2644 LNA

- 2.4GHz SiGe, High IP3 Low-Noise Amplifier (2400 to 2500 GHz)
- KEY FEATURES :
 - Low Noise Figure (2.0dB at 2450MHz) ;
 - High Gain: 16dB ;
 - Adjustable IIP3 (-8 to -3 dBm) and Bias Current ;
 - Low-Power Standby Mode ;
 - On-Chip Output Matching ;
 - +2.7V to +5.5V Single-Supply Operation ;
 - Ultra-Small 6-Pin SC70 Package.

Typical Operating Circuit



RF S-Parameters

!MAXIM INTEGRATED PRODUCTS

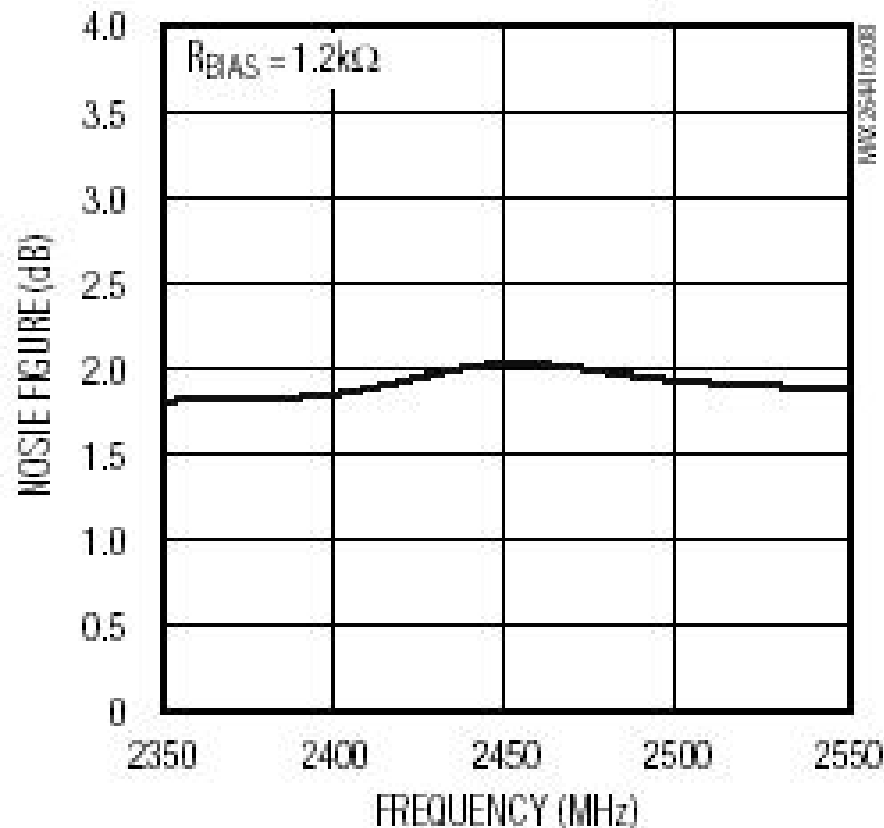
!MAX2644 2.4GHz Low Noise Amplifier

!Table 1. MAX2644 Typical Scattering Parameters (RBIAS=750ohm, VCC=+3.0V, TA=+25癯.)

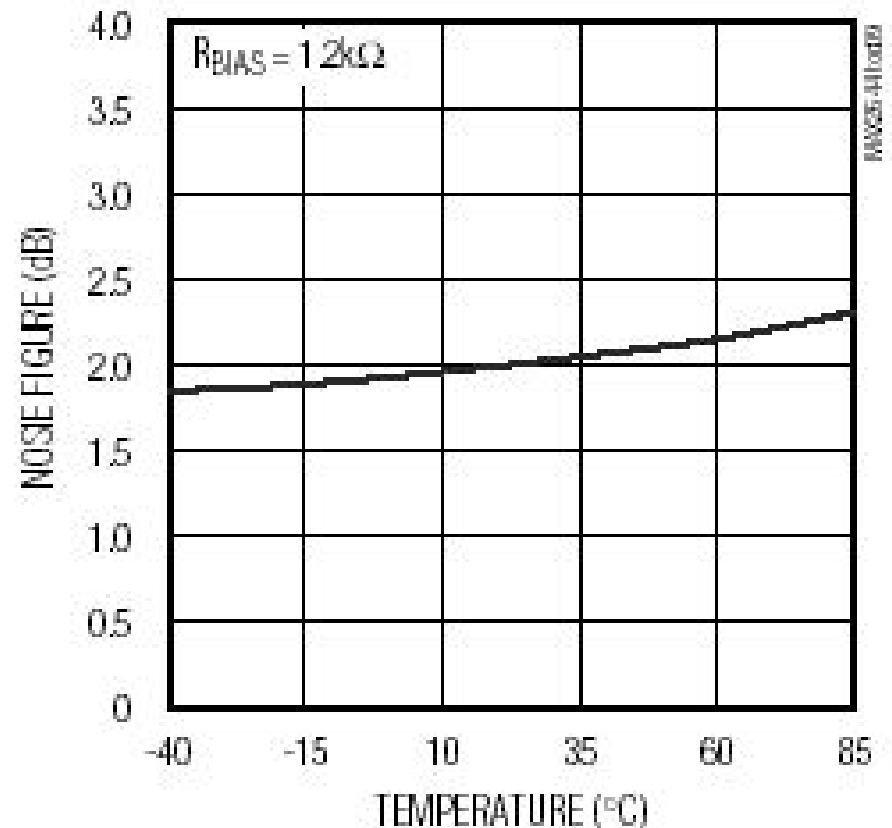
!FREQ.	S11		S21		S12		S22	
! (MHz)	Mag	Phase	Mag	Phase	Mag	Phase	Mag	Phase
# MHZ	S	MA	R	50				
2200	0.3372	-79.36	5.1940	170.97	0.0414	157.19	0.2818	-73.71
2250	0.3098	-70.09	5.3156	166.79	0.0445	146.70	0.2204	-67.13
2300	0.3283	-57.20	5.4281	159.22	0.0469	130.62	0.1566	-50.26
2350	0.4005	-50.46	5.4175	150.70	0.0441	108.72	0.1480	-3.96
2400	0.4839	-50.28	5.3346	143.93	0.0349	85.67	0.2795	15.12
2450	0.5443	-56.33	5.0687	136.45	0.0233	58.80	0.4179	11.12
2500	0.5758	-60.09	4.9556	132.16	0.0113	27.74	0.5135	3.28
2550	0.5784	-63.61	4.5952	127.68	0.0041	-38.98	0.5622	-2.66
2600	0.5698	-66.56	4.2364	126.58	0.0063	-110.49	0.5986	-7.45
2650	0.5600	-68.51	4.1376	126.51	0.0103	-128.93	0.6208	-10.43
2700	0.5533	-69.86	4.0729	120.60	0.0133	-140.21	0.6425	-12.93

MAX2644 Noise Figure

NOISE FIGURE vs. FREQUENCY

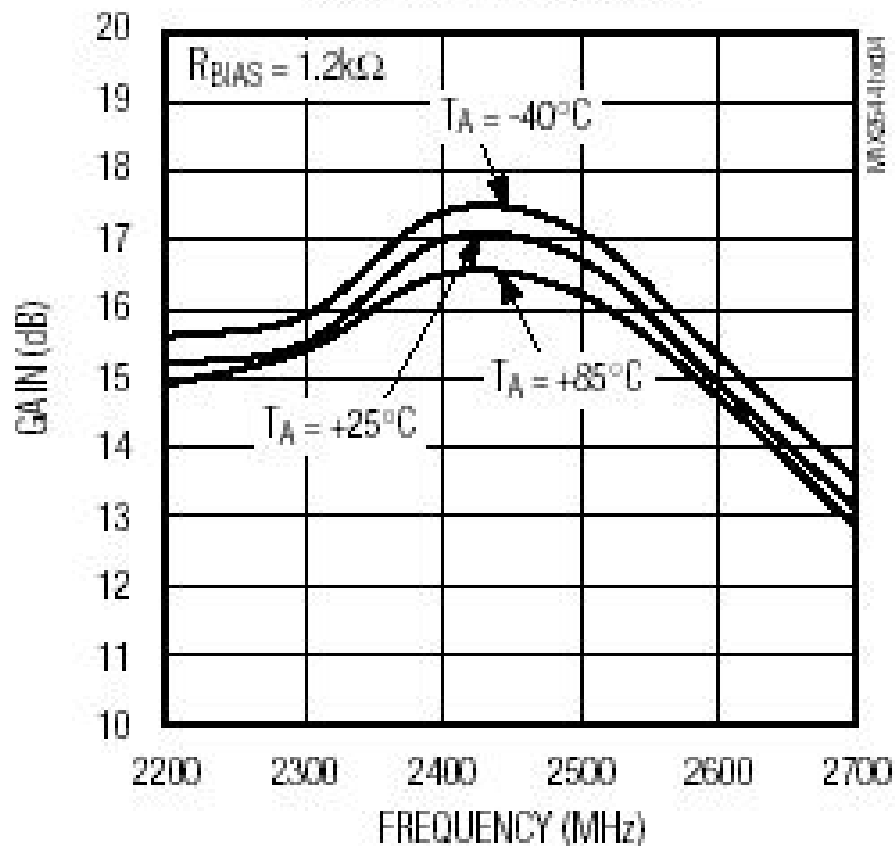


NOISE FIGURE vs. TEMPERATURE

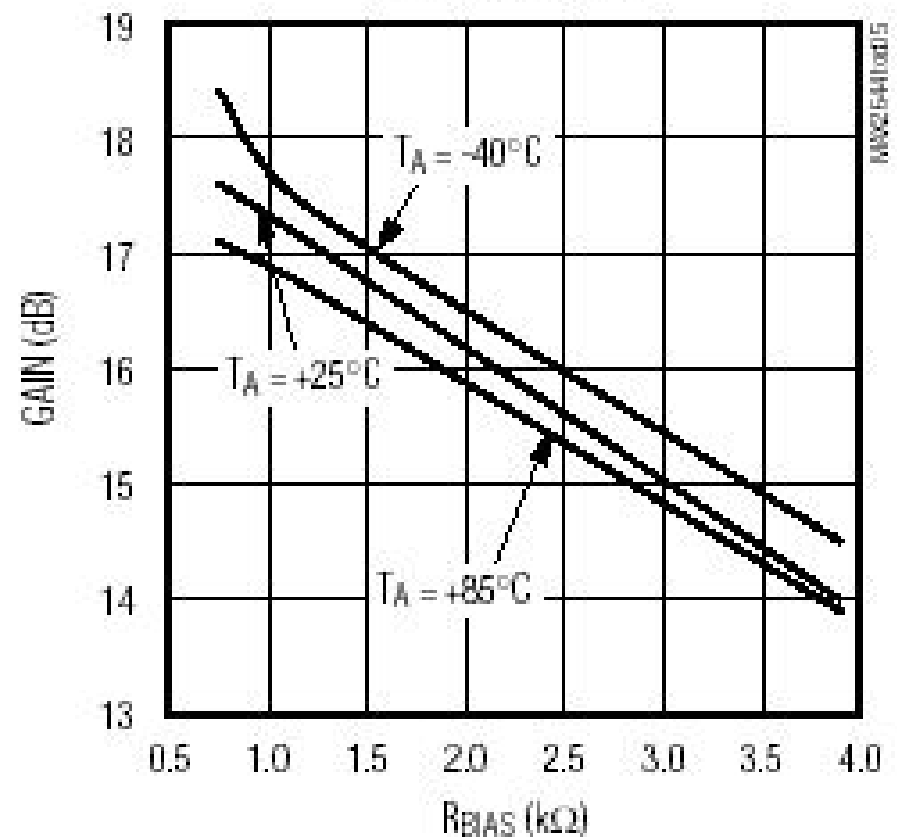


MAX2644 Gain

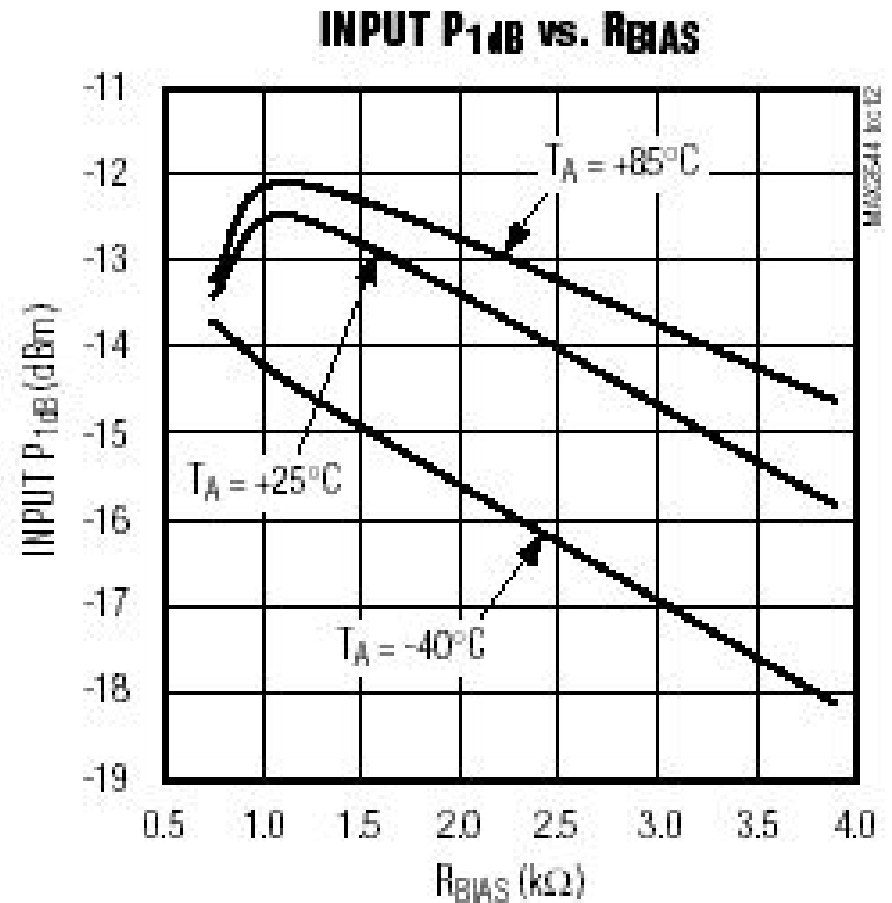
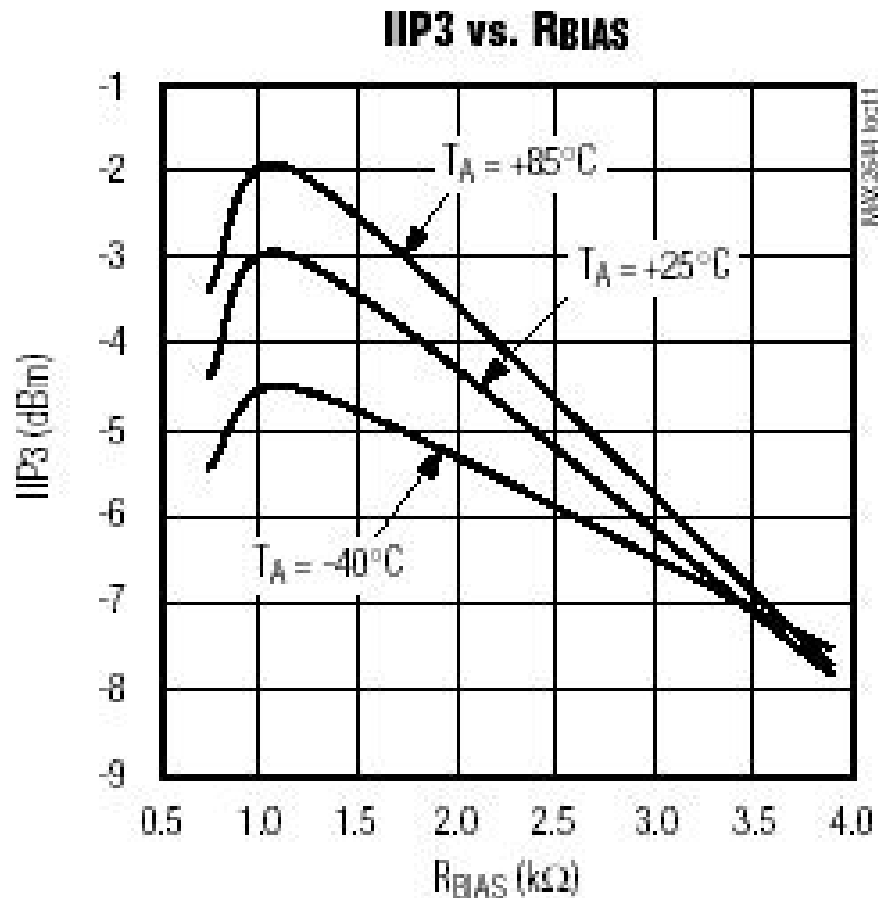
GAIN vs. FREQUENCY



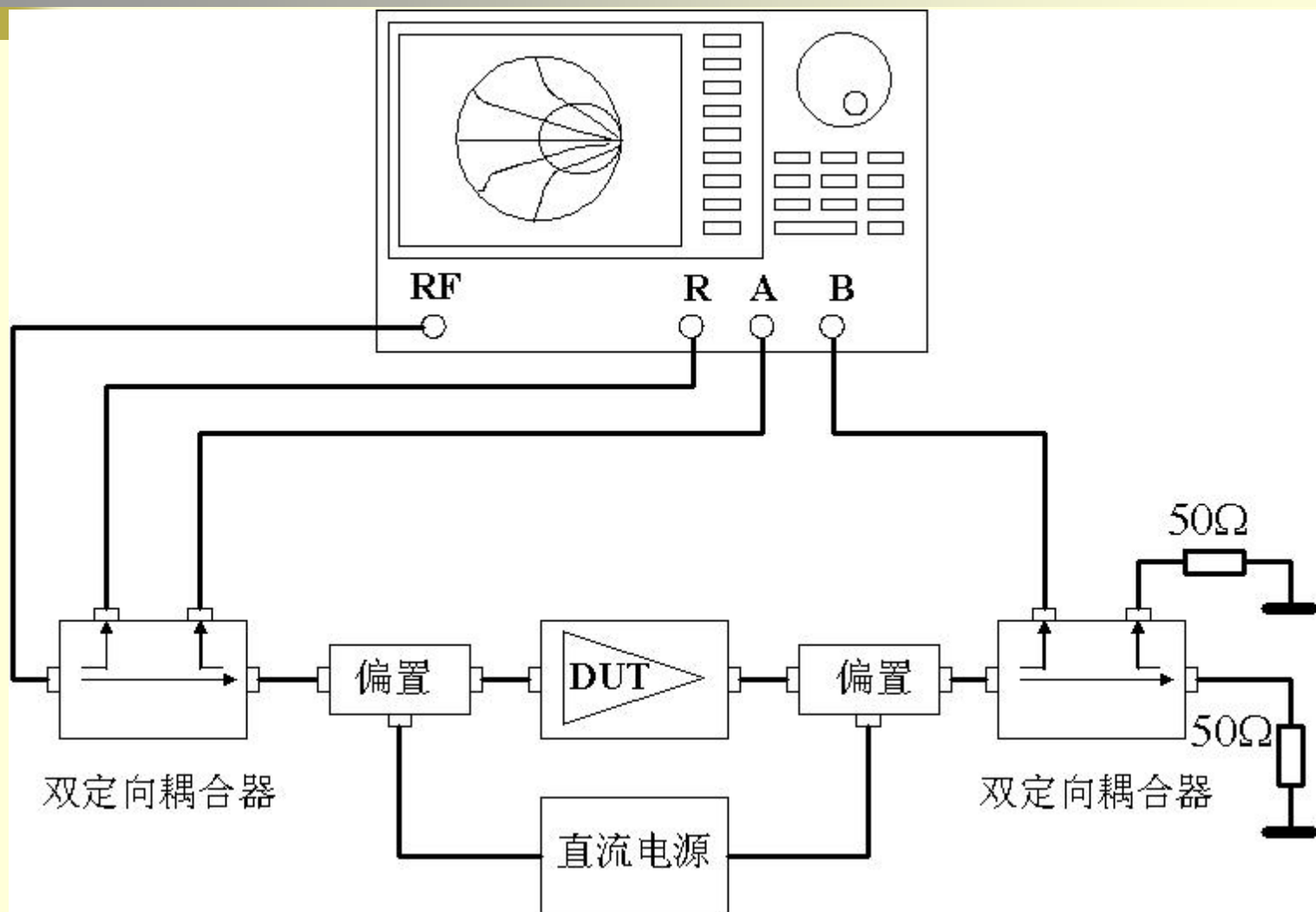
GAIN vs. R_BIAS



MAX2644 IIP3 and P_{1dB}



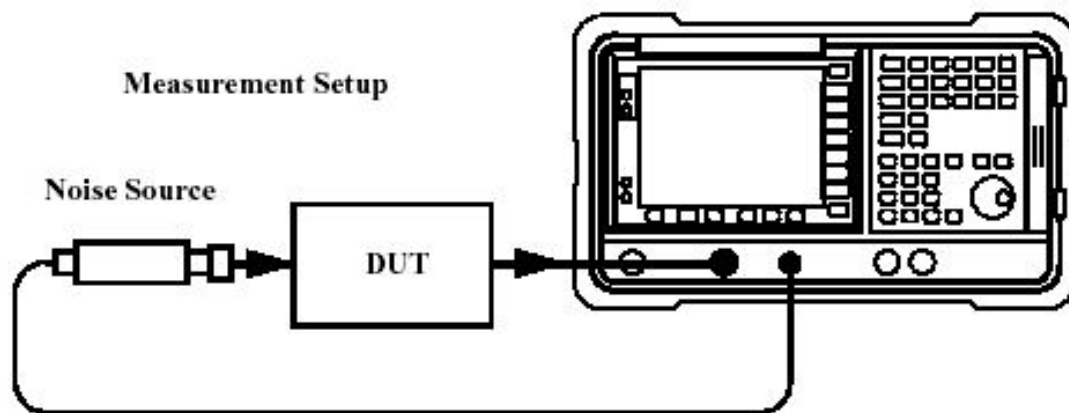
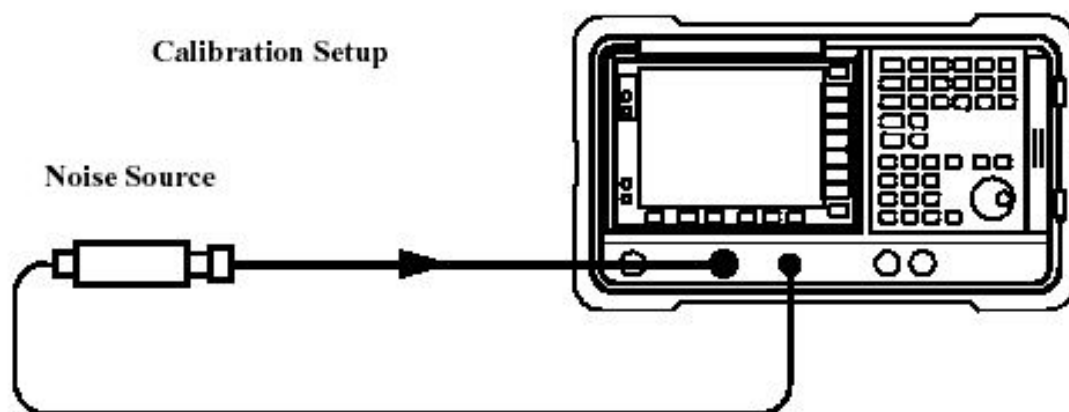
低噪声放大器的S参数测试



低噪声放大器的噪声系数和增益测试

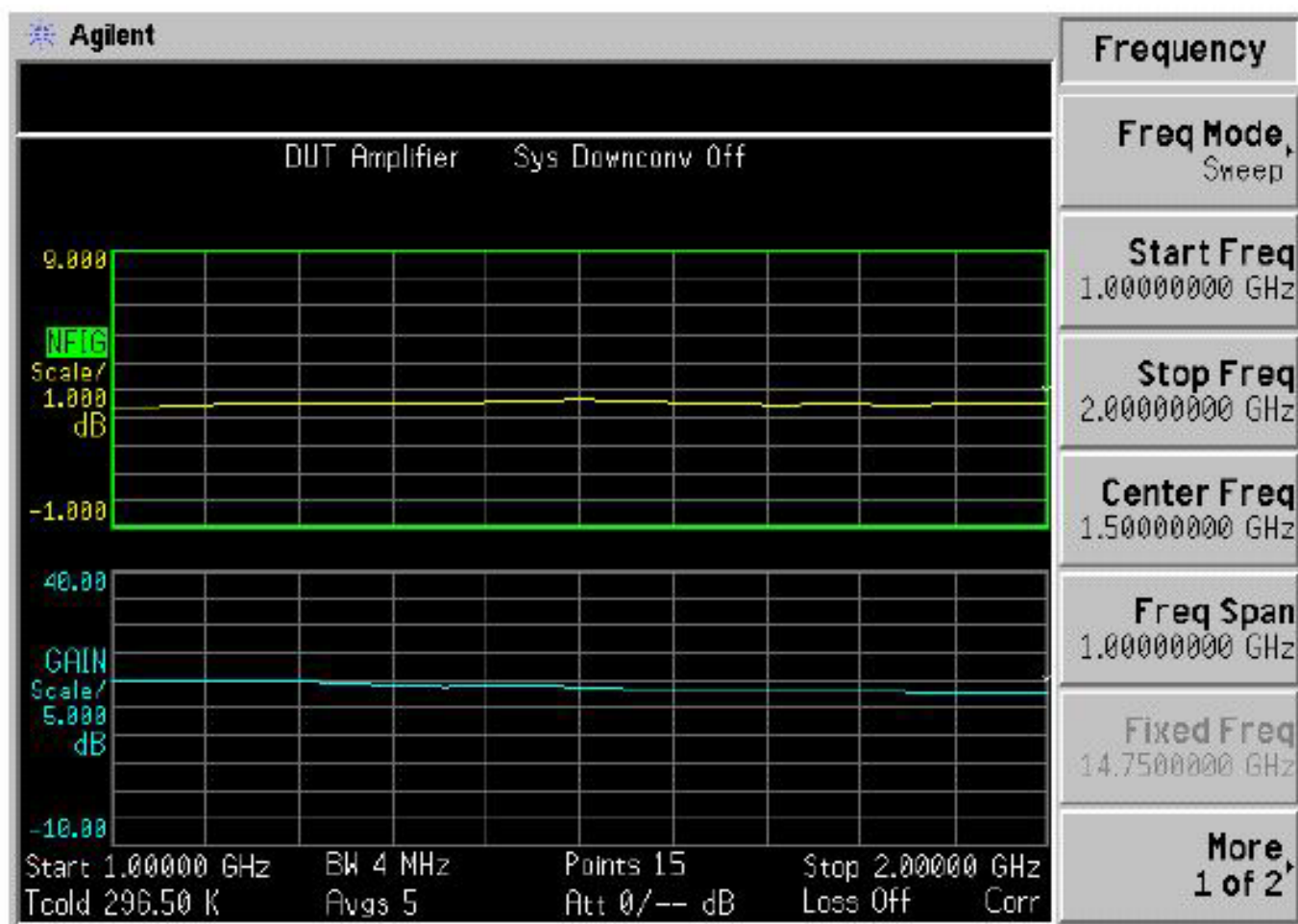
- 右图是使用346A/B/C通用噪声源；
- 若使用SNS噪声源，则需利用SNS噪声源连接器。

Basic Noise Figure Measurement — No Frequency Conversion



低噪声放大器的噪声系数和增益测量结果的图表方式显示

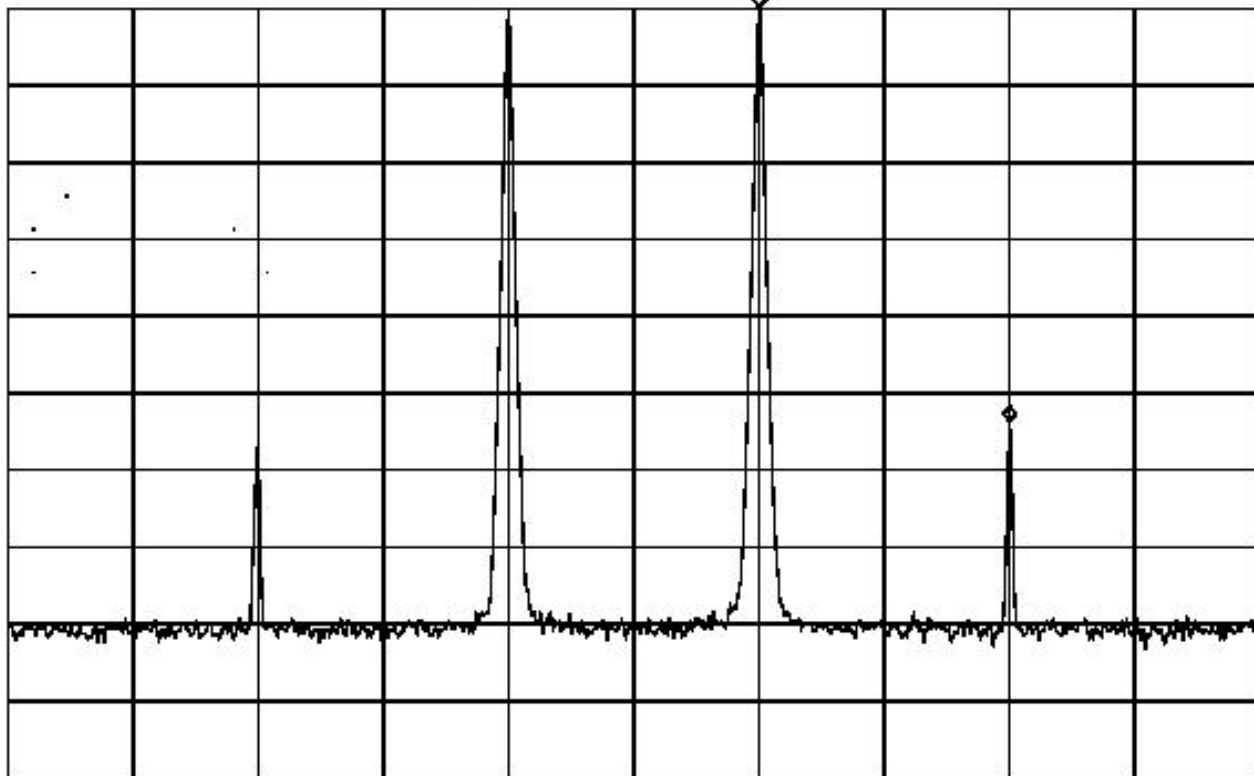
Typical Graphical Results after Measurement



- 由ESG信号源产生F1和F2信号,利用频谱分析仪观测 $2F_1 - F_2$ 信号或 $2F_2 - F_1$ 信号。

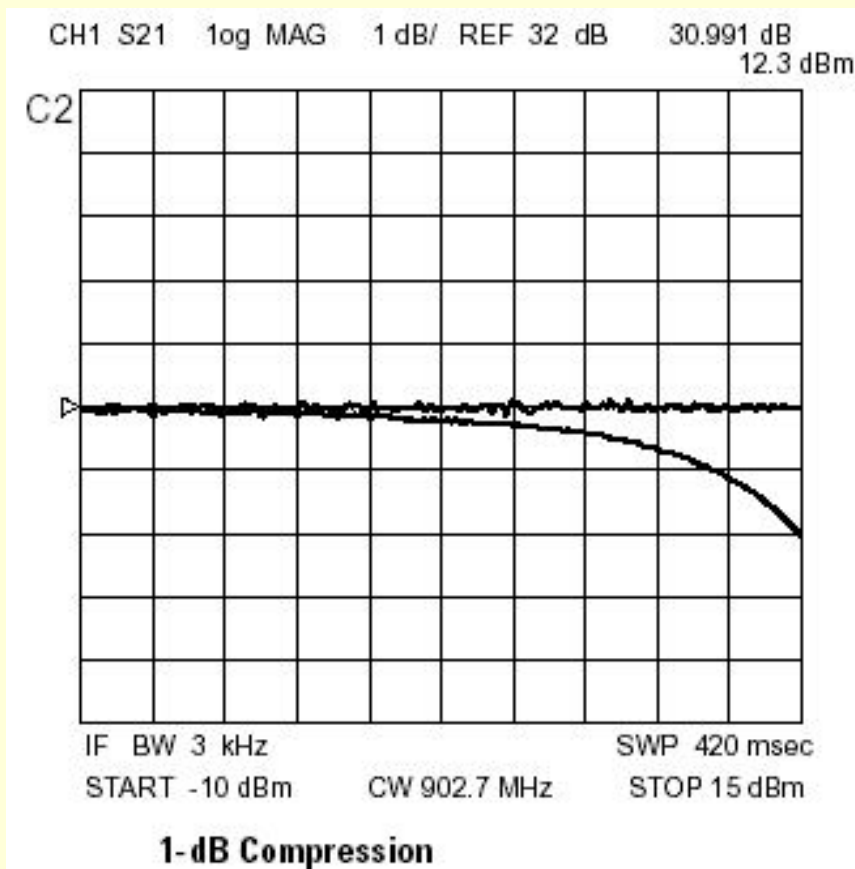
低噪声放大器的IIP3测试

Intermodulation Distortion Measured in dBc



低噪声放大器的 P_{1dB} 测试

- 如下图所示，这是1dB压缩点最普遍的测量方法：利用RF矢量网络分析仪进行输出功率扫描（ $F=902.7\text{MHz}$ ）。



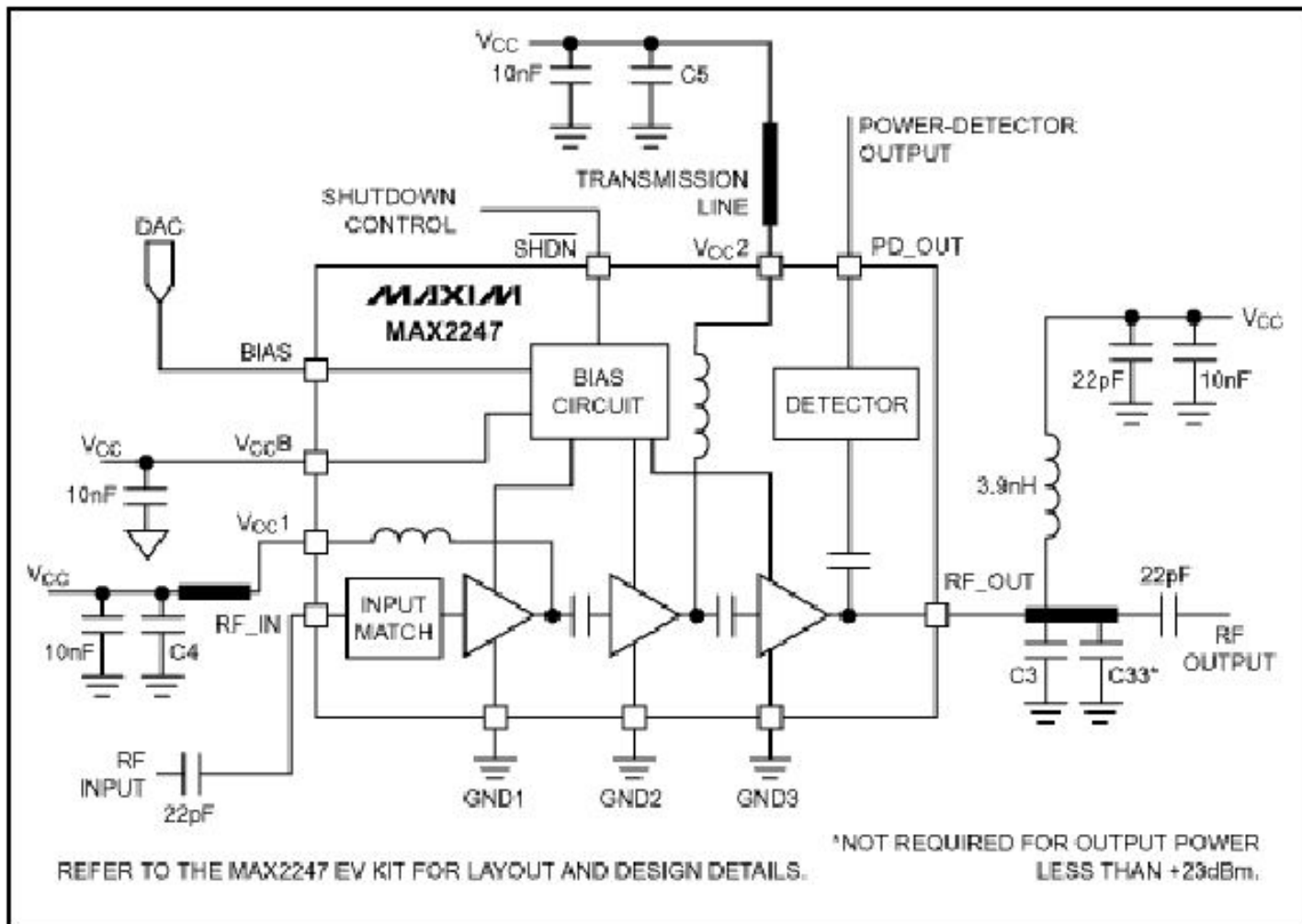
- **1-dB compression:** input power resulting in 1-dB **drop** in gain
- Ratioed measurement
- Output power available (non-ratioed measurement)

12.4 功率放大器主要技术指标及其测试方案

- Power Gain
- ACPR (Adjacent channel power ratio)
- PAE (Power-added efficiency)
- MAX2247 2.4GHz SiGe线性功率放大器
 - 29dB功率增益；
 - 3.3V , +24dBm输出功率下：
 - 效率 (PAE) 为24%；
 - 可以获得低于-32dBc的一阶旁瓣抑制率 (ACPR) ；
 - 以及低于-55dBc的二阶旁瓣抑制率 (ACPR) 。

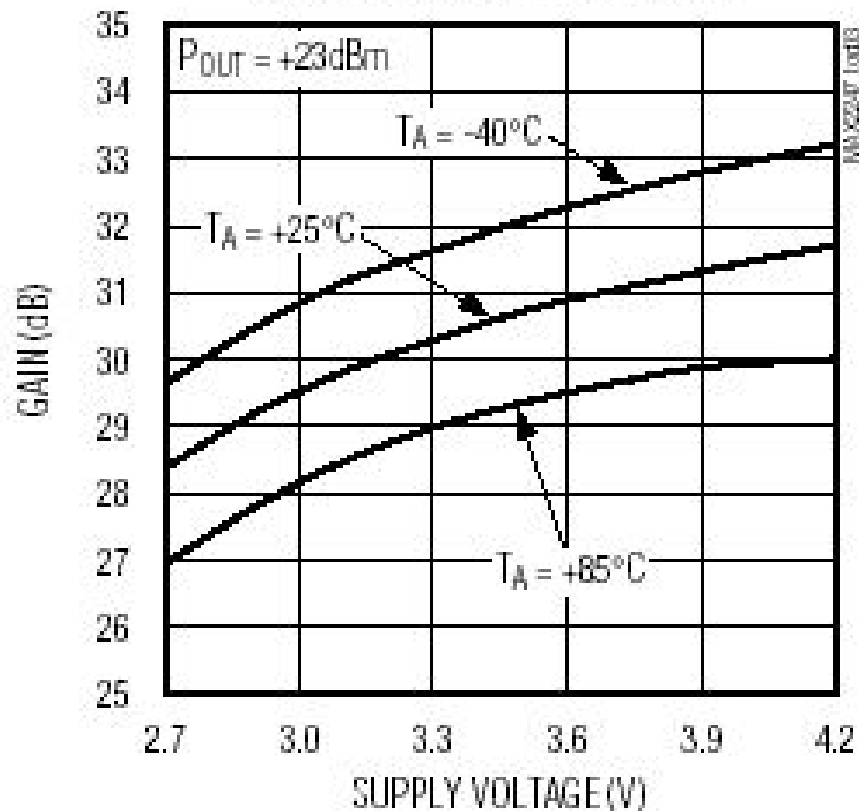
MAX2247 PA

- 
- 2.4GHz SiGe Linear Power Amplifier (2400 to 2500 GHz)
 - KEY FEATURES :
 - 2.4GHz to 2.5GHz Operating Range ;
 - Up to +24dBm Linear Output Power (ACPR of Less than -32dBc First-Side Lobe and Less than -55dBc Second-Side Lobe) ;
 - 24% PAE at +24dBm Linear Output Power, 3.3V 24% PAE at +21dBm Linear Output Power, 3.0V
 - 29dB Power Gain ;
 - On-Chip Power Detector with Buffered Output ;
 - Internal 50 Input Matching ;
 - Integrated Bias Circuitry ;
 - +2.7V to +4.2V Single-Supply Operation ;
 - 0.5 μ A Shutdown Mode ;
 - Tiny Chip-Scale Package (1.5mm x 2mm)。

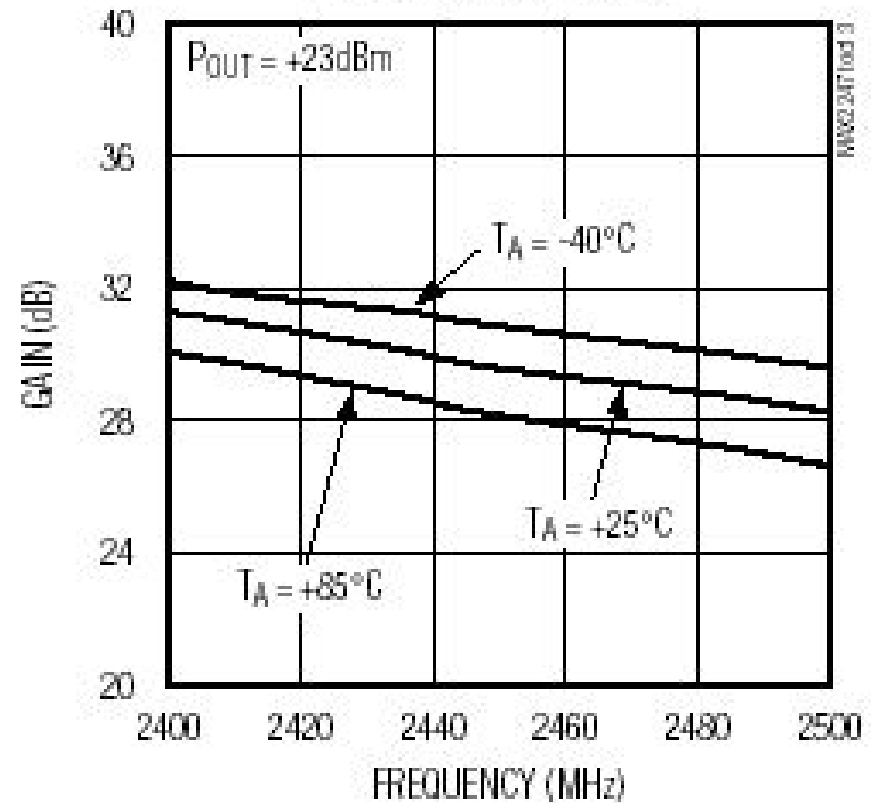


MAX2247 Gain

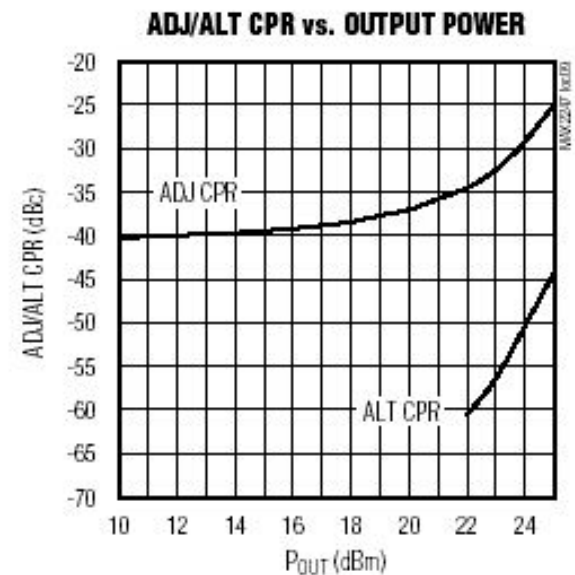
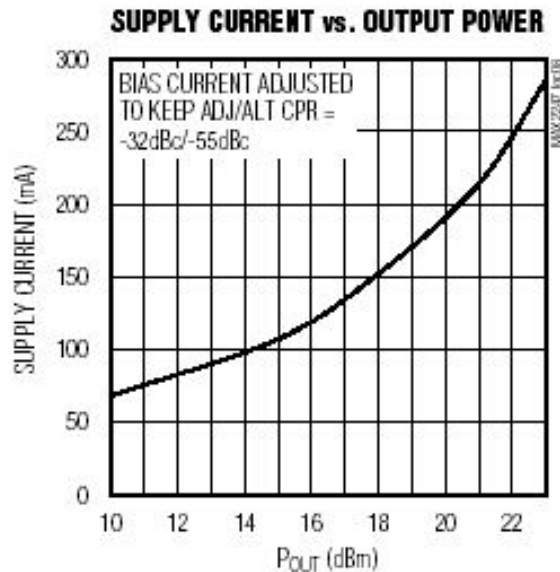
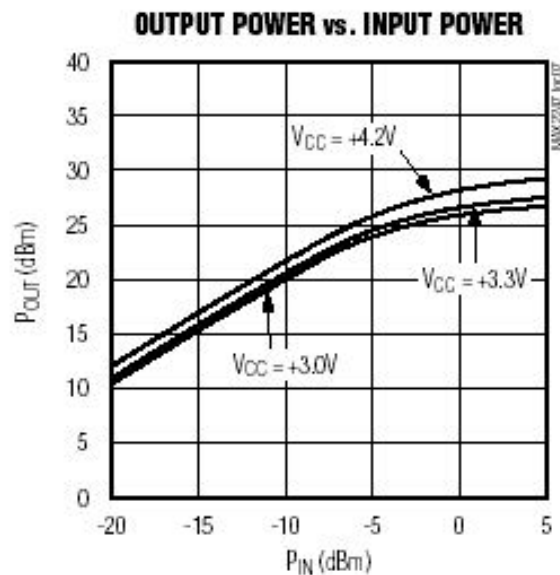
GAIN vs. SUPPLY VOLTAGE



GAIN vs. FREQUENCY

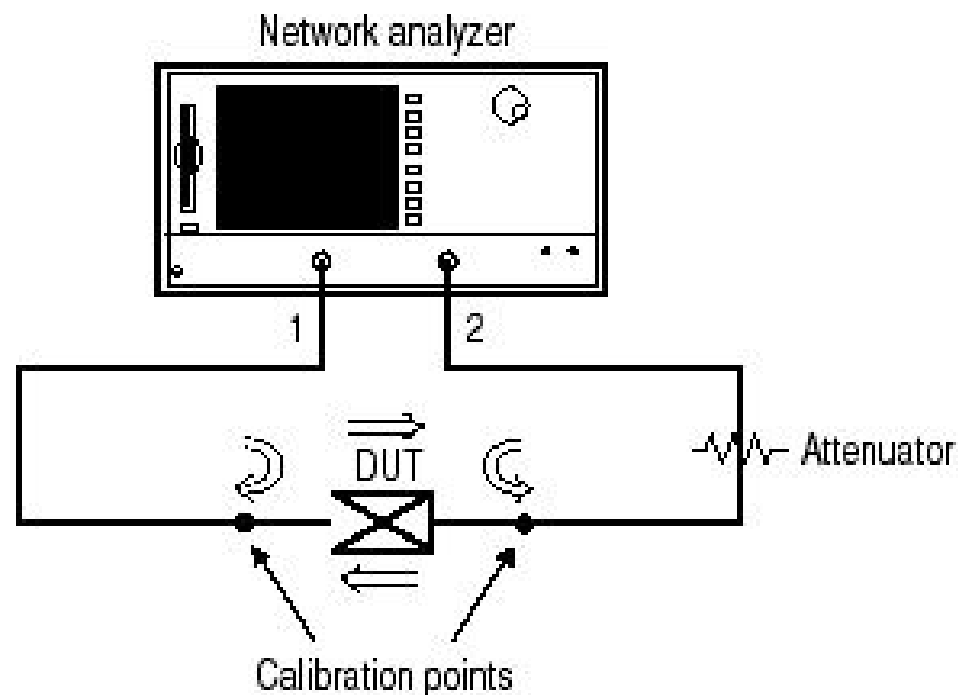


MAX2247 OUTPUT POWER

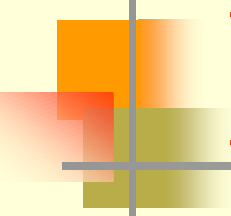


MAX2247功率增益测量

- 无需前置放大器；
- 正向和反向测量；
- 两端口误差校准或频响误差校准。

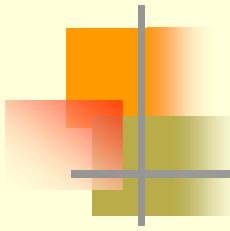


Configuration 1



12.5 振荡器主要技术指标及其测试方案

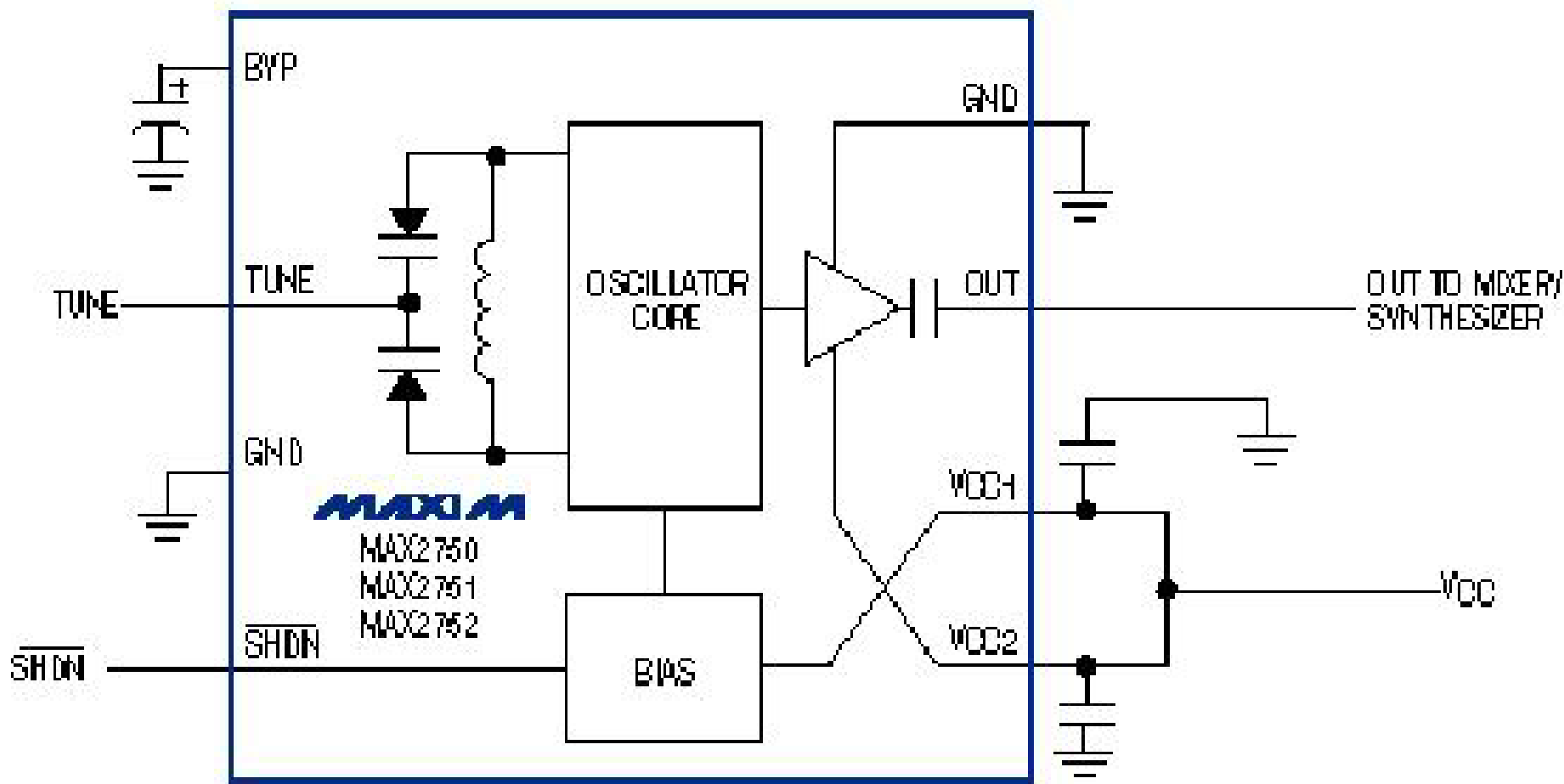
- Output Power
- Phase Noise
- Tuning Gain
- Return Loss
- Harmonics



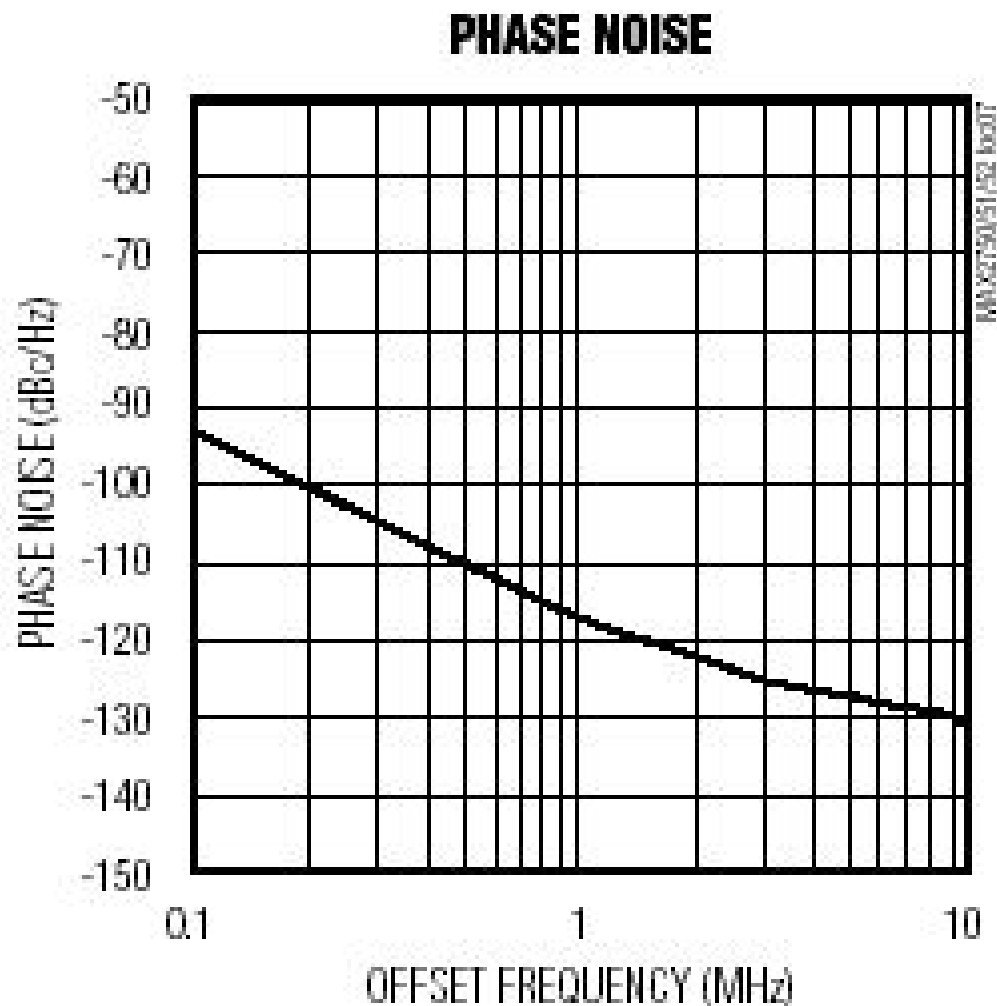
MAX2750 VCO

- 2.4GHz Monolithic Voltage-Controlled Oscillators
- KEY FEATURES :
 - 2400MHz to 2500MHz Frequency Tuning Range (Zero IF) ;
 - -3dBm Output Power ;
 - -125dBc/Hz Phase Noise at 4MHz Offset ;
 - Tuning Gain ($f_{osc} = 2400\text{MHz}, +3\text{V}$) 140 MHz/V ;
 - Return Loss 12dB ;
 - Harmonics -30dBc ;
 - On-Chip Tank Circuit ;
 - Internally Matched Output Buffer Amplifier.

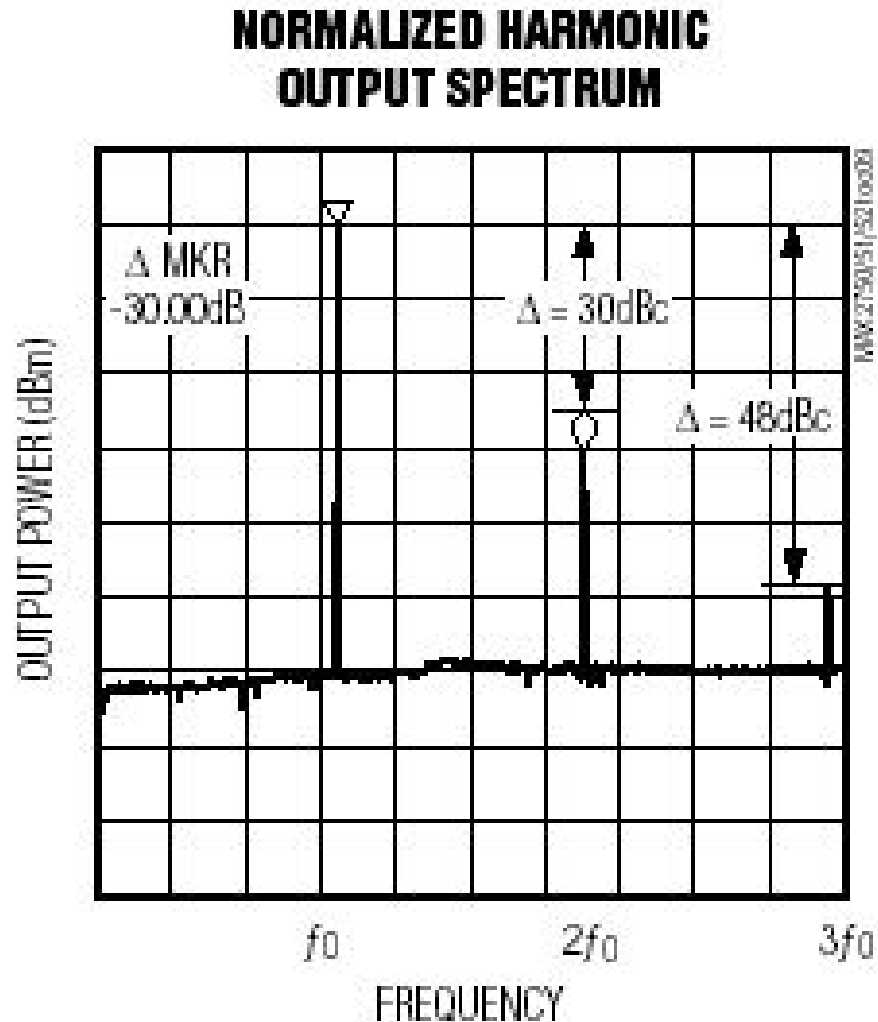
Typical Operating Circuit



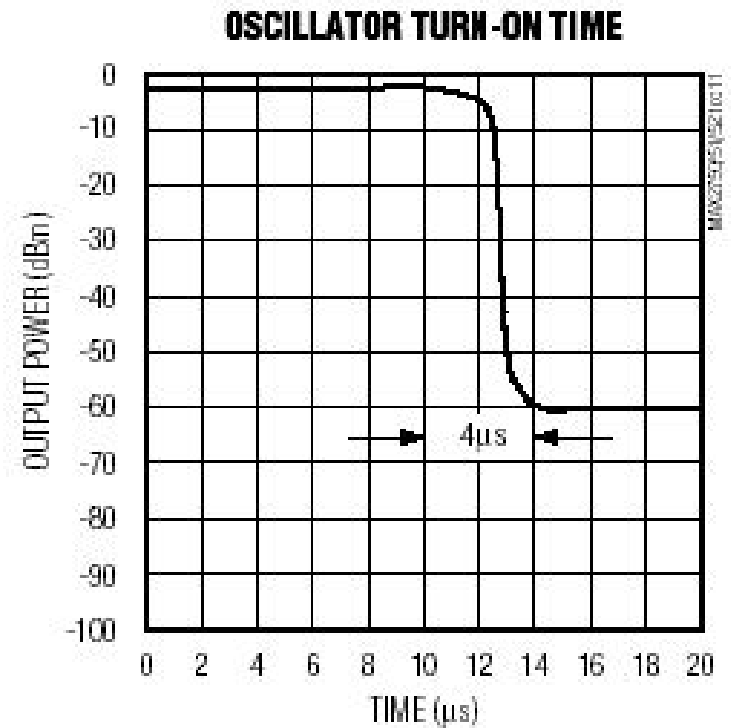
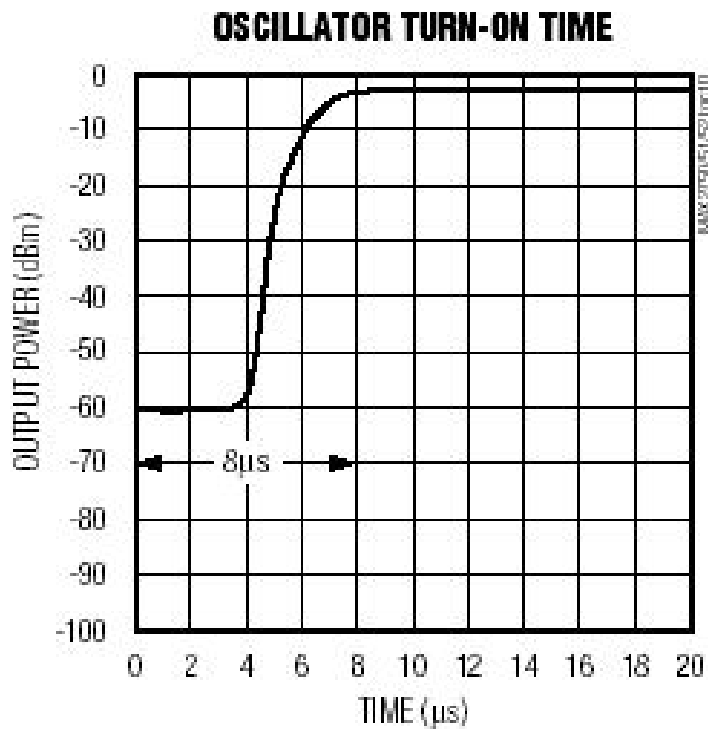
MAX2750 VCO Phase Noise



MAX2750 VCO Harmonics



MAX2750 VCO On/Off



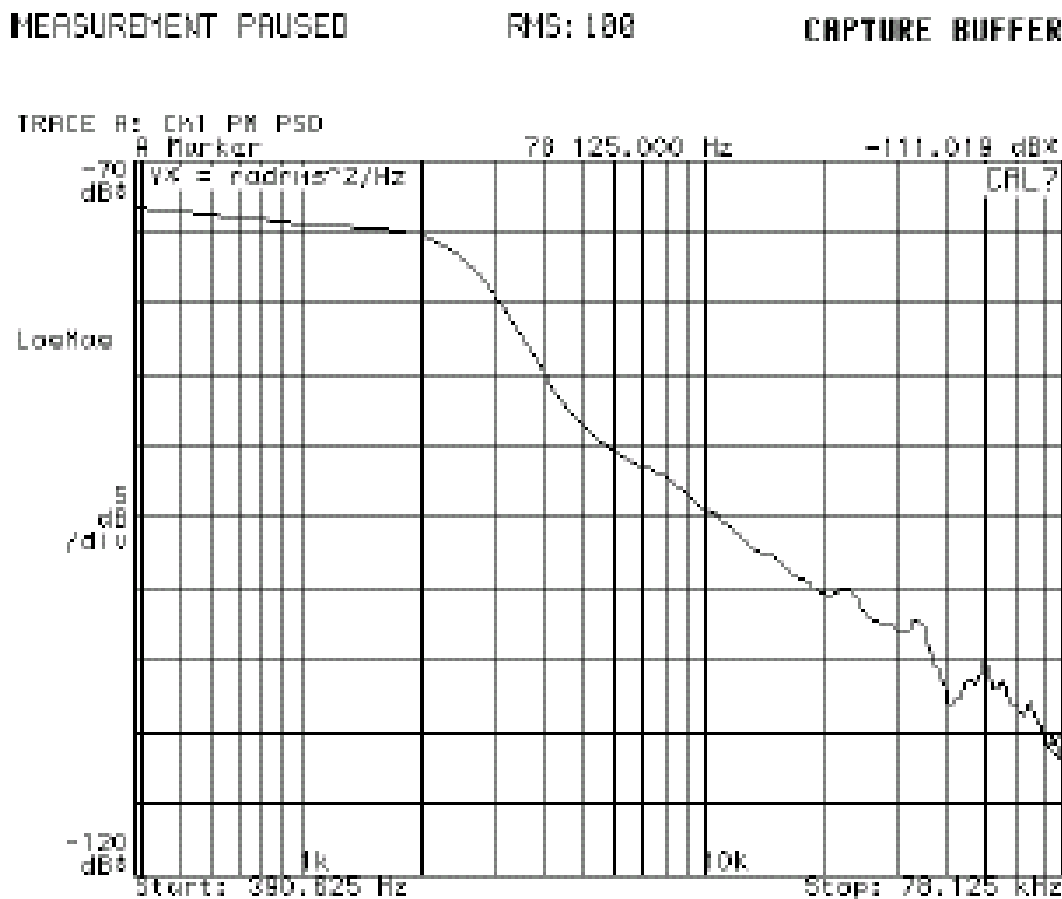


用频谱分析仪测试VCO相位噪声

- 将VCO的输出连接到频谱分析仪的输入端；
- 设置频谱分析仪的频率与VCO的频率相同；
- 在频谱分析仪上开启视频平均功能；
- 读出载波幅度和噪声幅度之差，减去 $10 \log \text{RBW}$ ，近似等于相位噪声，单位为 dBc/Hz （RBW是频谱分析仪设定的分辨带宽）。

用矢量信号分析仪测试VCO相位噪声

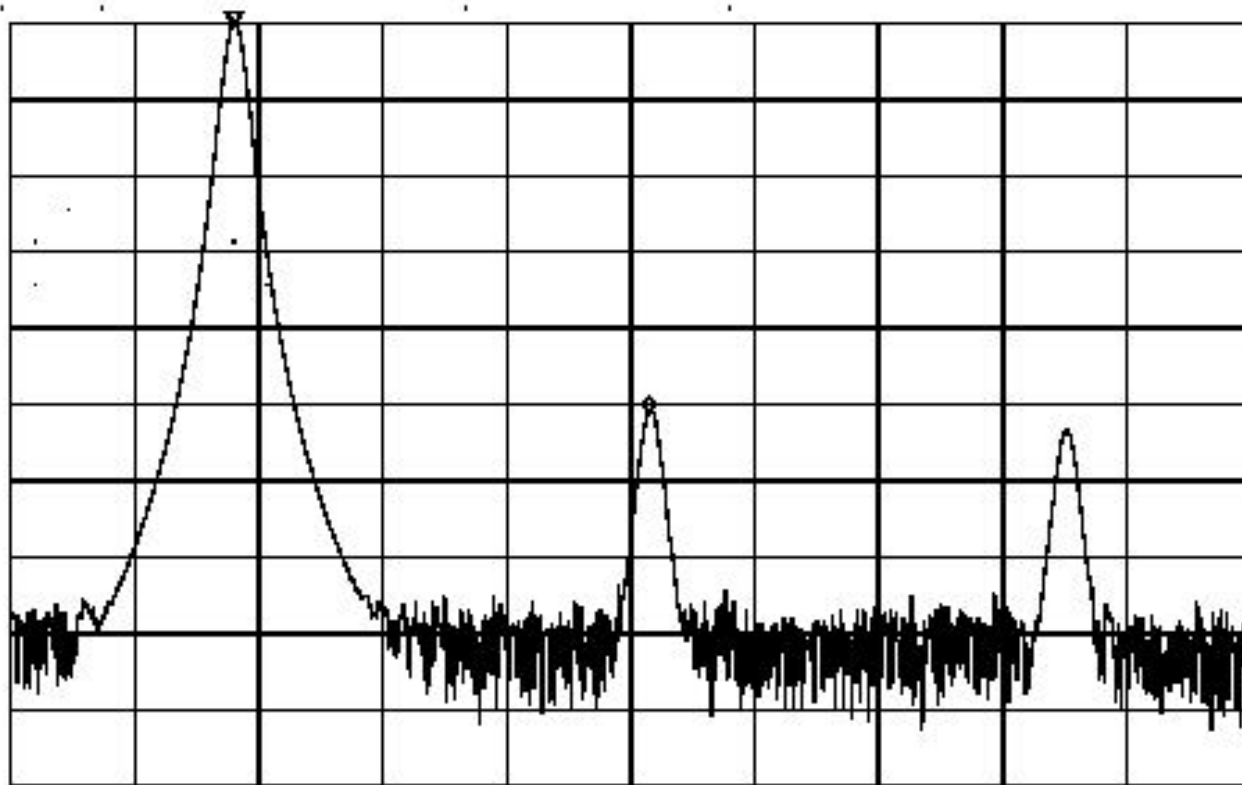
- 相位噪声的测量：
 - 测量信号的PSD；
 - $\log x$ ；
 - 平均。




Phase Noise Plot

MAX2750 Harmonics 测试

Harmonic Distortion in dBc (marker threshold set to -70 dB)





MAX2750 THD 测试

used in the equation below to compute total harmonic distortion:

$$\frac{\sqrt{(A_2)^2 + (A_3)^2 + (A_4)^2 \dots + (A_n)^2}}{A_1} \times 100$$

Where:

A_1 = the amplitude of the fundamental frequency, in volts

A_2 = the amplitude of the second harmonic, in volts

A_3 = the amplitude of the third harmonic, in volts

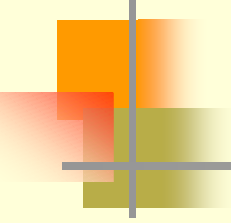
A_4 = the amplitude of the fourth harmonic, in volts

A_n = the amplitude of the n th harmonic, in volts



12.6 混频器主要技术指标及其测试方案

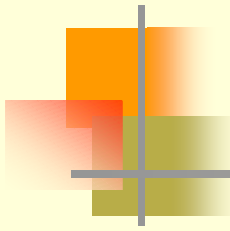
- Conversion Gain
- IIP3
- $P_{1\text{dB}}$
- Noise Figure
- Spurious Response
- Isolation and Leakage



MIXER : MAX9996

- SiGe High-Linearity, 1700MHz to 2200MHz
Downconversion Mixer with L0
Buffer/Switch
- **MAX9996 Typical Application Circuit**

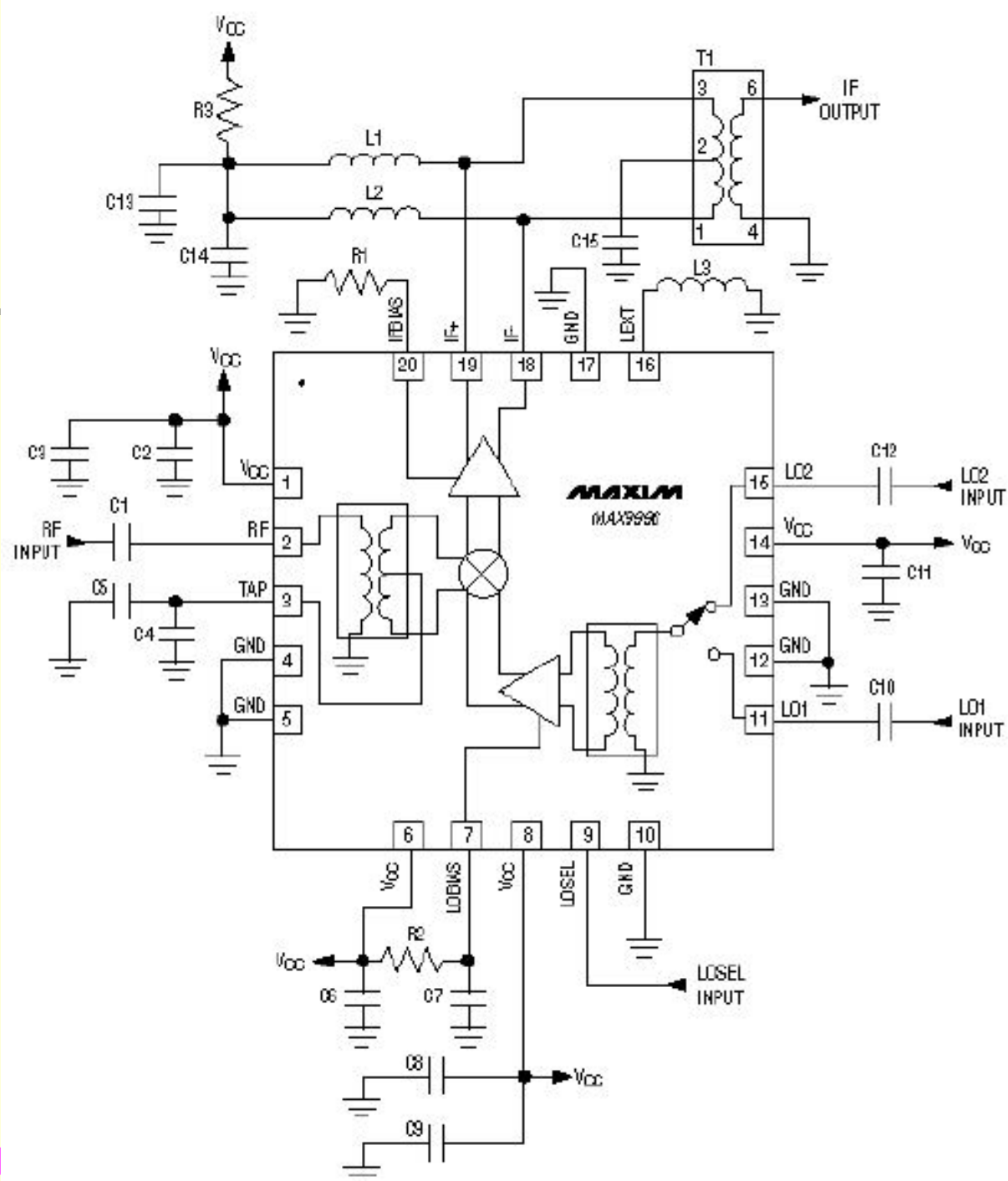
MAX9996 Typical values

- 
- Typical values are at
 - $V_{CC} = +5V$, $P_{RF} = -5dBm$, $P_{LO} = 0dBm$,
 - $f_{RF} = 1900MHz$, $f_{LO} = 2100MHz$, $f_{IF} = 200MHz$,
 - $T_C = +25^\circ C$, unless otherwise noted.
 - Conversion Gain ($P_{RF} < +2dBm$)
 - IIP3 (Two tones: $f_{RF1} = 2000MHz$, $f_{RF2} = 2001MHz$, $P_{RF} = -5dBm/tone$, $f_{LO} = 2200MHz$, $P_{LO} = 0dBm$, $T_A = +25^\circ C$)
 - P1dB
 - Noise Figure (Single sideband)
 - Spurious Response at IF ($2LO-2RF$, $3LO-3RF$)
 - L01 to L02 Isolation, Minimum RF-to-IF Isolation
 - Maximum L0 Leakage at RF Port, Maximum L0 Leakage at IF Port
 - RF Port Return Loss, L0 Port Return Loss, IF Port Return Loss

MAX9996 ■ KEY FEATURES :

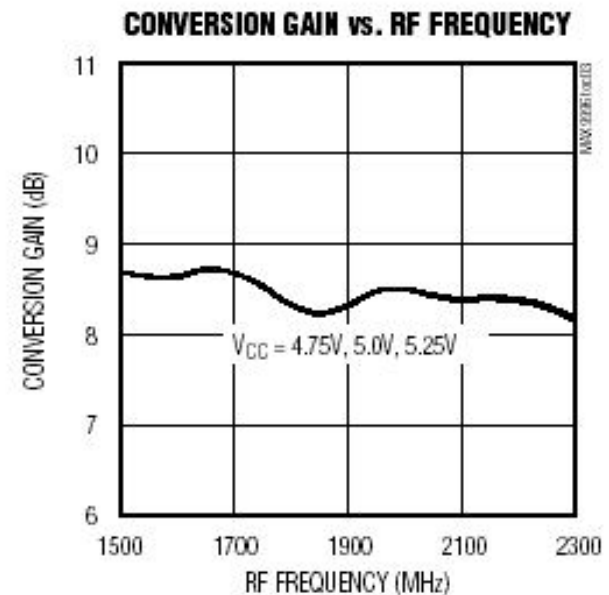
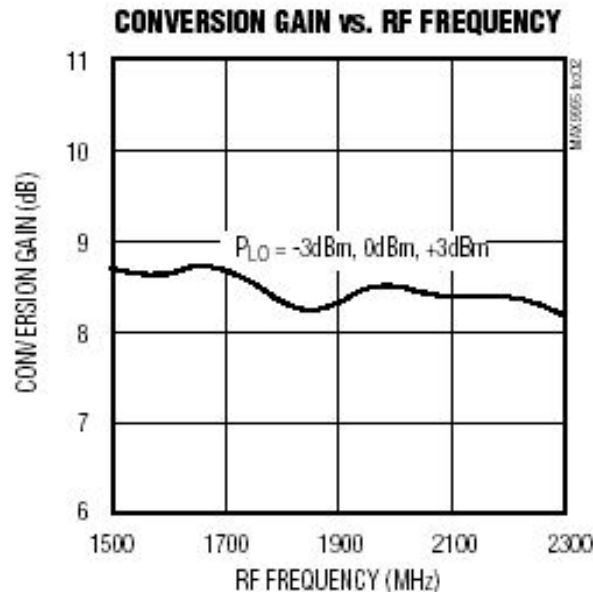
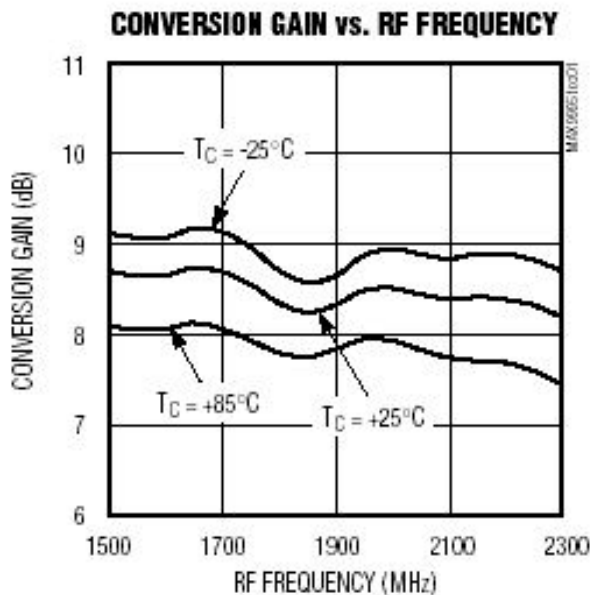
- 1900MHz to 2400MHz LO Frequency Range ;
- 40MHz to 350MHz IF Frequency Range ;
- 8.3dB Conversion Gain ($P_{RF} < +2\text{dBm}$) ;
- +26.5dBm Input IP3 ;
- +12.6dBm Input 1dB Compression Point ;
- 9.7dB Noise Figure ;
 - 72dBc 2LO-2RF Spurious Rejection at $P_{RF} = -10\text{dBm}$;
- Integrated LO Buffer ;
 - Integrated RF and LO Baluns for Single-Ended Inputs ;
- Low -3dBm to +3dBm LO Drive ;
 - Built-In SPDT LO Switch with 43dB L01 to L02 Isolation and 50ns Switching Time ;
 - Pin Compatible with MAX9984/MAX9986 815MHz to 995MHz Mixers ;
- Functionally Compatible with MAX9993.

Typical Operating Circuit



MAX9996 Conversion Gain

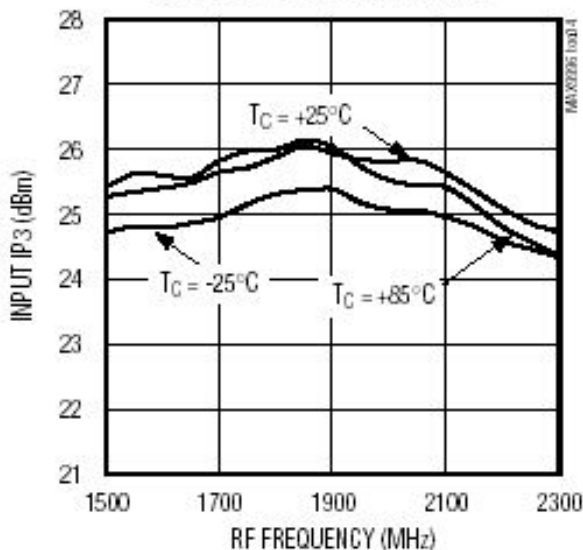
- Conversion Gain vs RF Frequency (-25° , $+25^{\circ}$, $+85^{\circ}$)
- Conversion Gain vs RF Frequency ($P_{LO} = -3\text{dBm}$, 0dBm , 3dBm)
- Conversion Gain vs RF Frequency ($V_{CC} = 4.75\text{V}$, 5.0V , 5.25V)



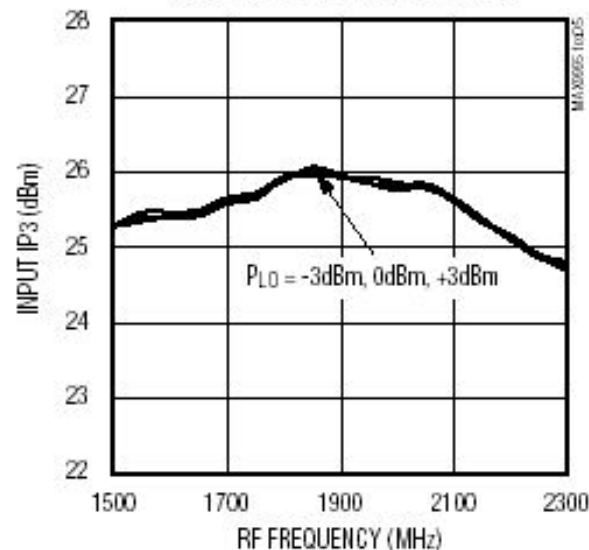
MAX9996 IIP3

- Input IIP3 vs RF Frequency (-25° , $+25^{\circ}$, $+85^{\circ}$)
- Input IIP3 vs RF Frequency ($P_{LO} = -3\text{dBm}$, 0dBm , 3dBm)
- Input IIP3 vs RF Frequency ($V_{CC} = 4.75\text{V}$, 5.0V , 5.25V)

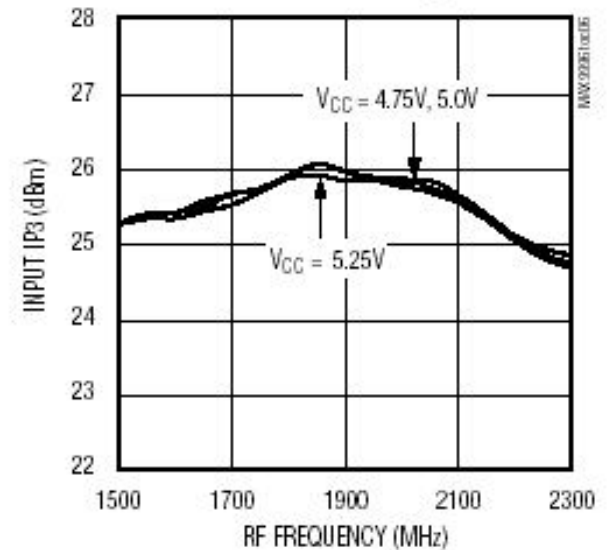
INPUT IP3 vs. RF FREQUENCY



INPUT IP3 vs. RF FREQUENCY

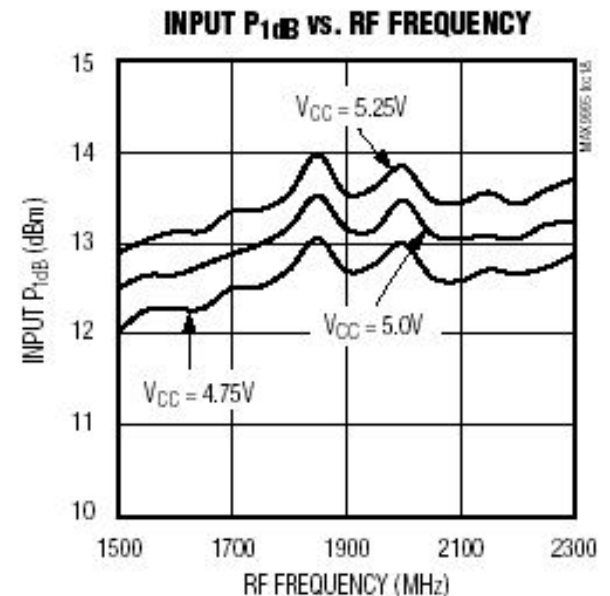
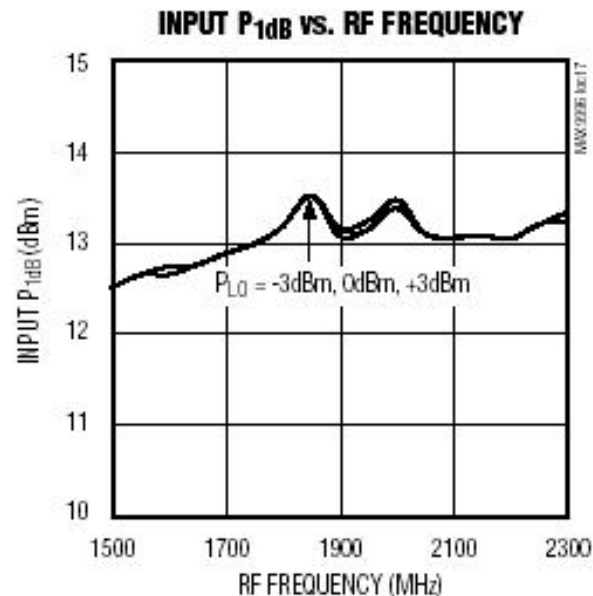
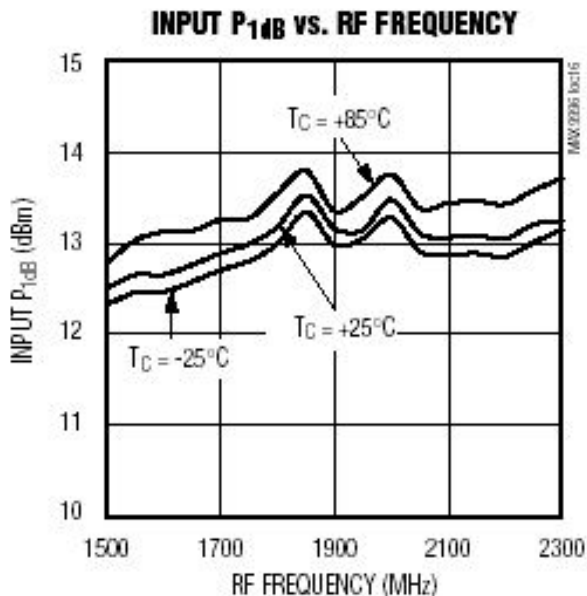


INPUT IP3 vs. RF FREQUENCY



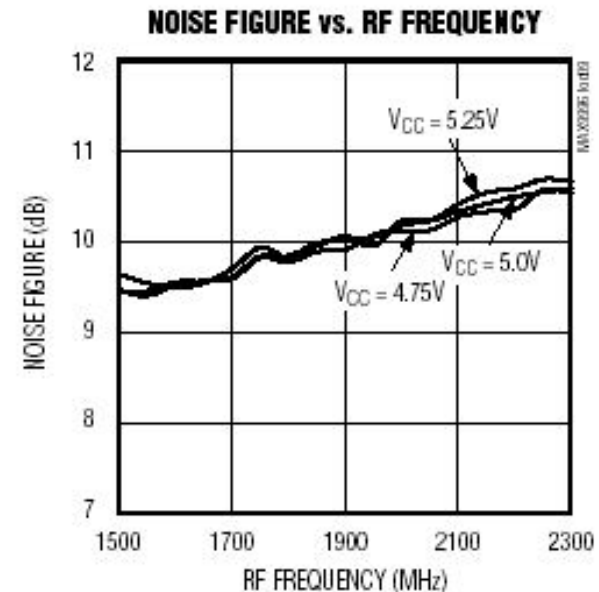
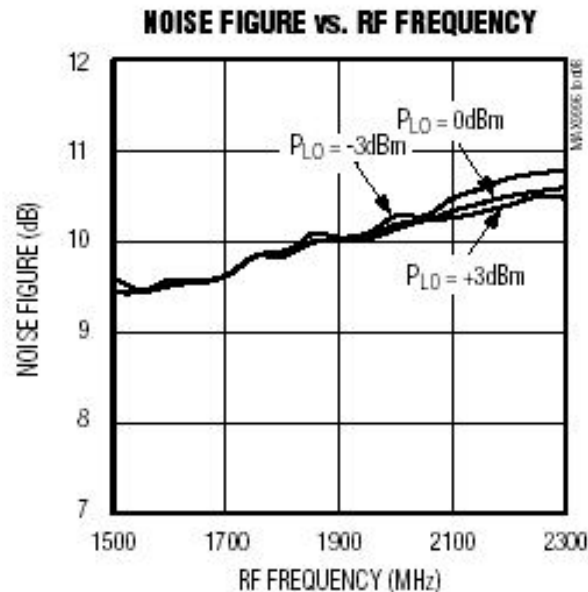
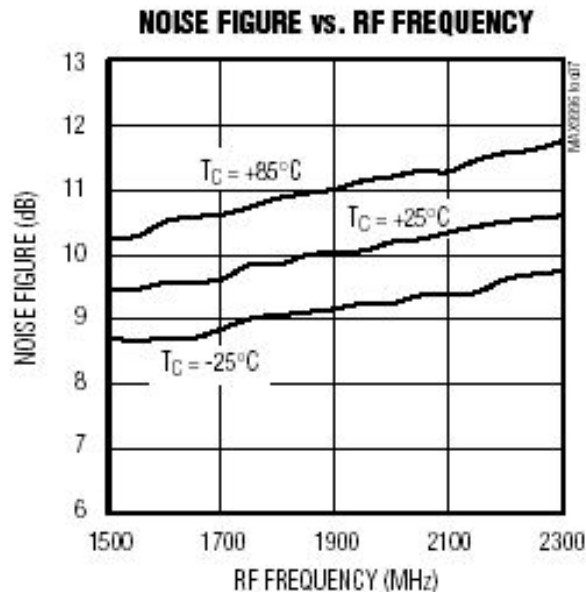
MAX9996 P_{1dB}

- Input P_{1dB} vs RF Frequency (-25° , $+25^{\circ}$, $+85^{\circ}$)
- Input P_{1dB} vs RF Frequency ($P_{LO} = -3dBm$, $0dBm$, $3dBm$)
- Input P_{1dB} vs RF Frequency ($V_{CC} = 4.75V$, $5.0V$, $5.25V$)



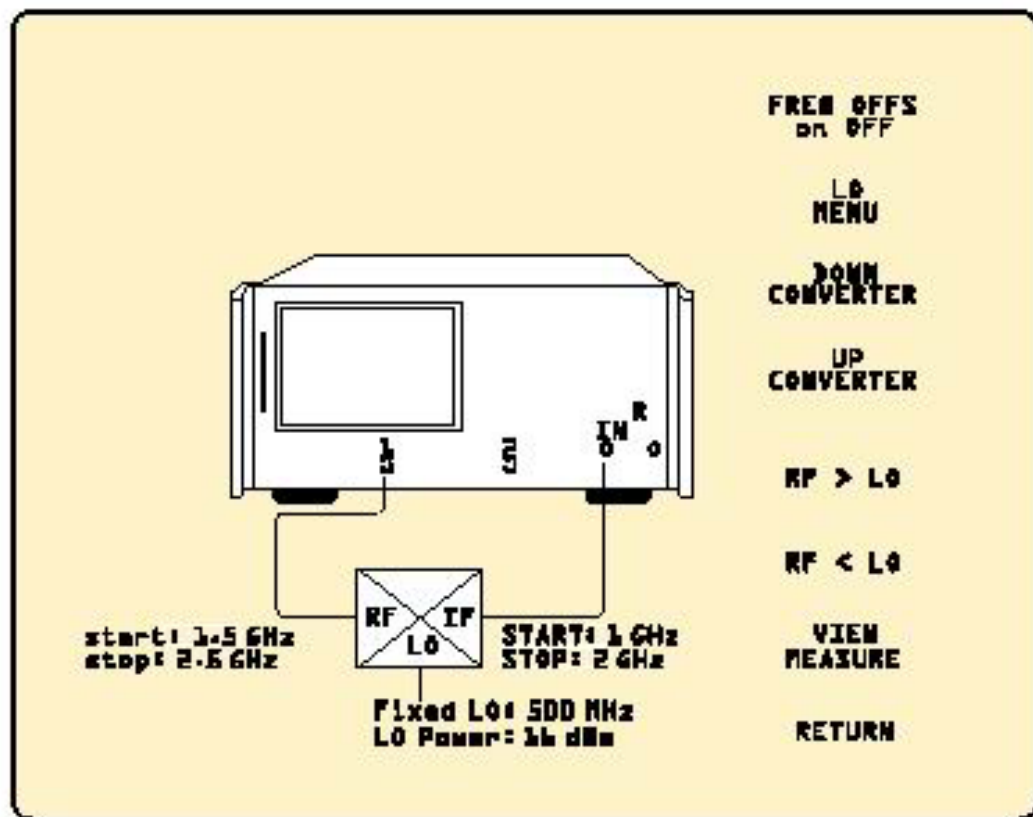
MAX9996 Noise Figure

- Input NF vs RF Frequency (-25° , $+25^{\circ}$, $+85^{\circ}$)
- Input NF vs RF Frequency ($P_{LO} = -3\text{dBm}$, 0dBm , 3dBm)
- Input NF vs RF Frequency ($V_{CC} = 4.75\text{V}$, 5.0V , 5.25V)



混频器转换损耗（增益）测试

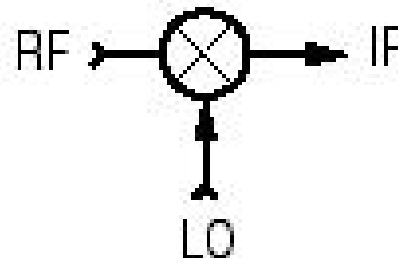
- 8753ES工作于 FREQ OFFS on off模式；
- 有上、下变频模式；
- 变频转换损耗测量；
- 反射测量；
- 隔离的测量。



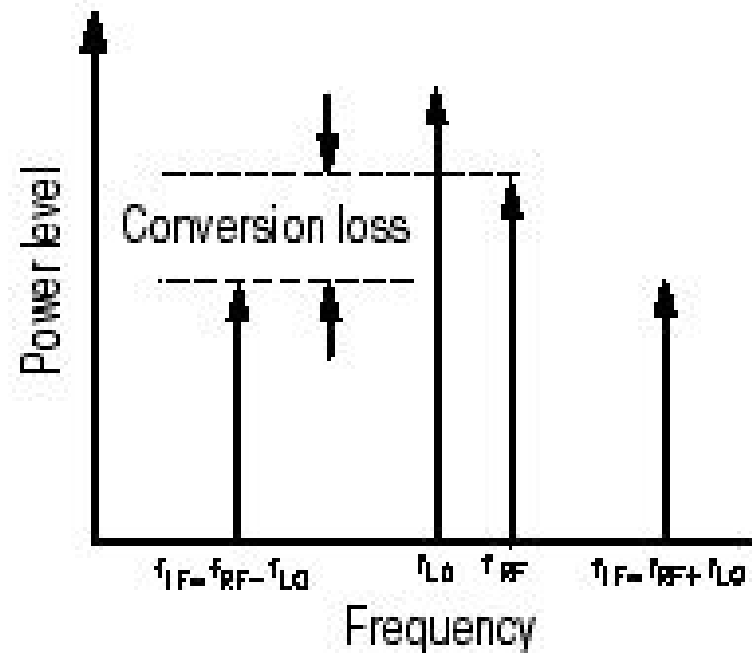
8753ES mixer measurement menu.

混频器转换损耗（增益）测试_1

注意：这里
IF是指混频
器的输出。

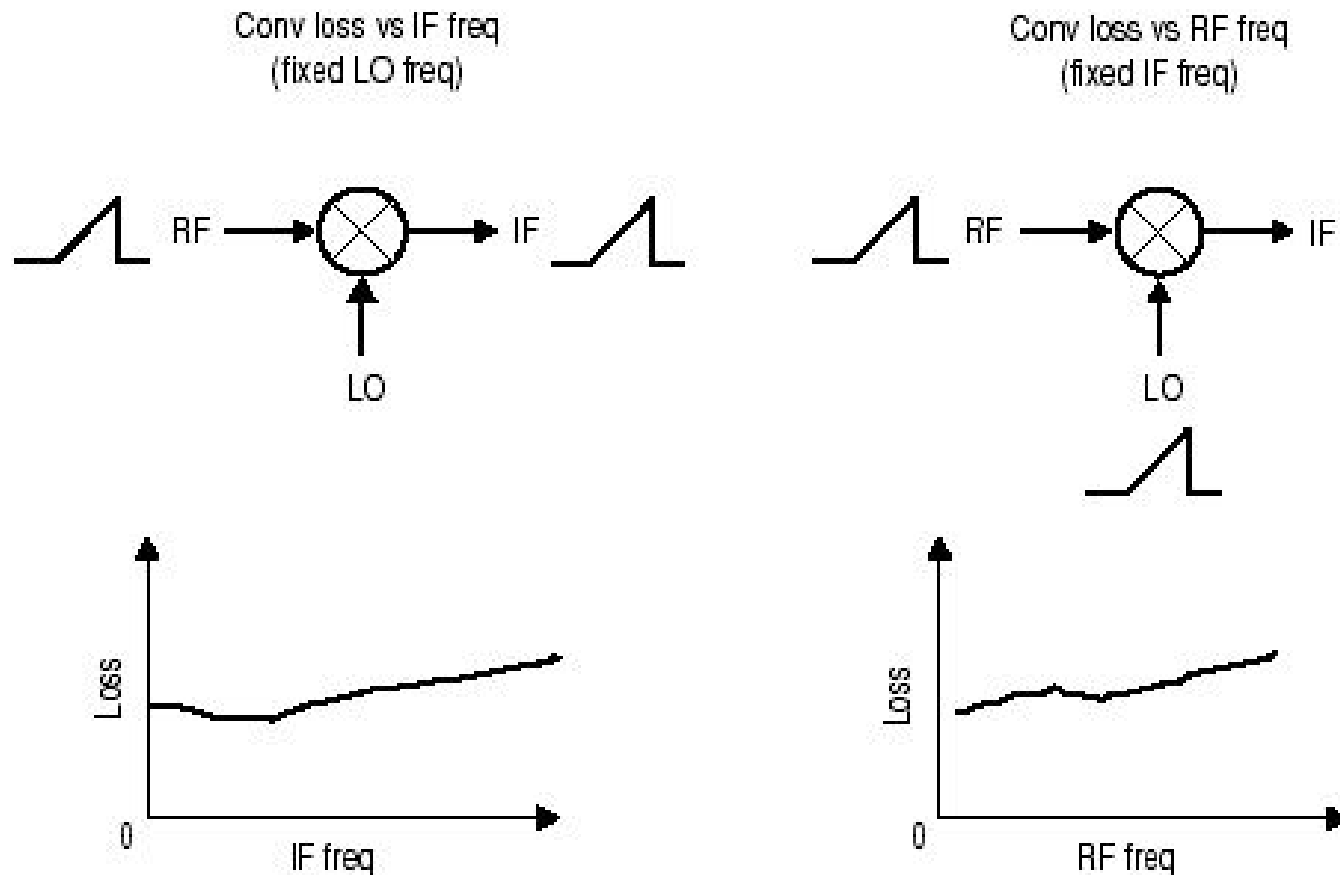


$$\text{Conversion loss} = 20 \cdot \log \left[\frac{\text{mag}(f_{\text{IF}})}{\text{mag}(f_{\text{RF}})} \right]$$



Conversion loss

变频转换损耗的两种测量方法



Two types of conversion loss measurements

- 由ESG信号源产生RF1和RF2信号,利用频谱分析仪观测IF1和IF2信号,两就是IIP3信号。

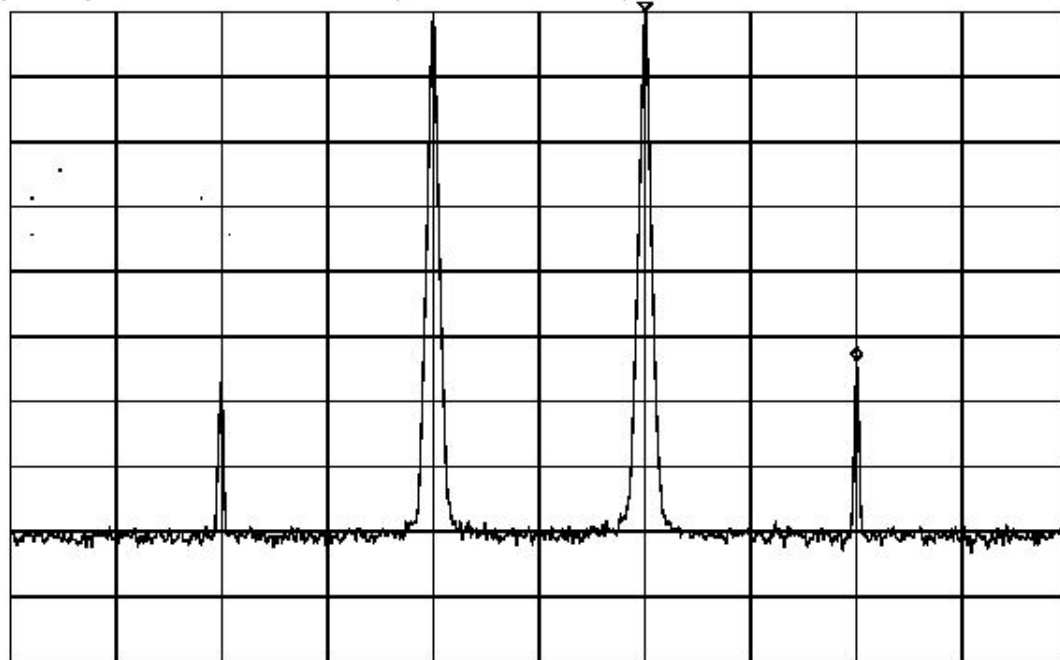
混频器 IIP3 测试

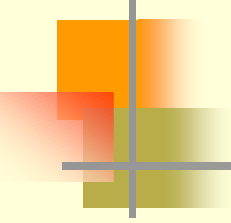
- IIP3

- Two tones:

- $f_{RF1} = 2000\text{MHz}$,
- $f_{RF2} = 2001\text{MHz}$,
- $P_{RF} = -5\text{dBm/tone}$,
- $f_{LO} = 2200\text{MHz}$,
- $P_{LO} = 0\text{dBm}$.

Intermodulation Distortion Measured in dBc

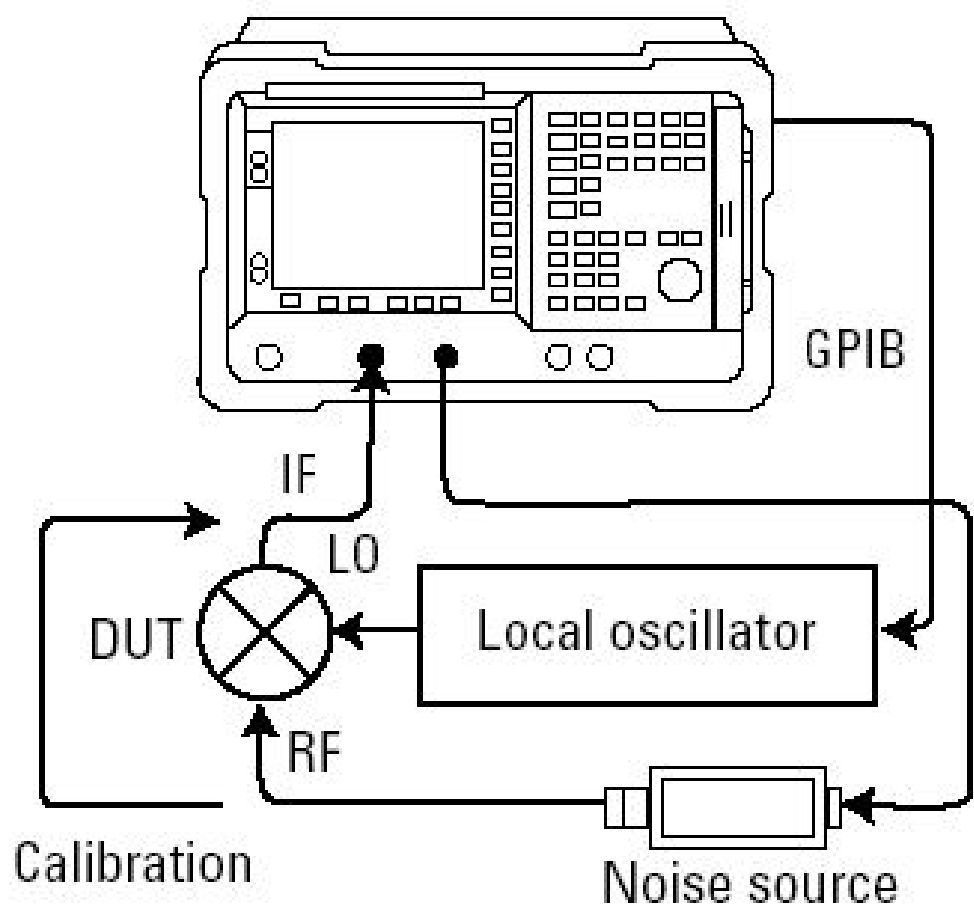


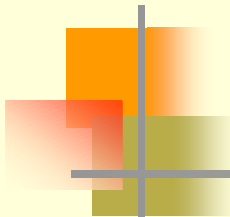


混频器 $P_{1\text{dB}}$ 测试

混频器 Noise Figure 测试

- 可变LO和固定IF测量模式
- 若使用SNS噪声源，则需利用SNS噪声源连接器。





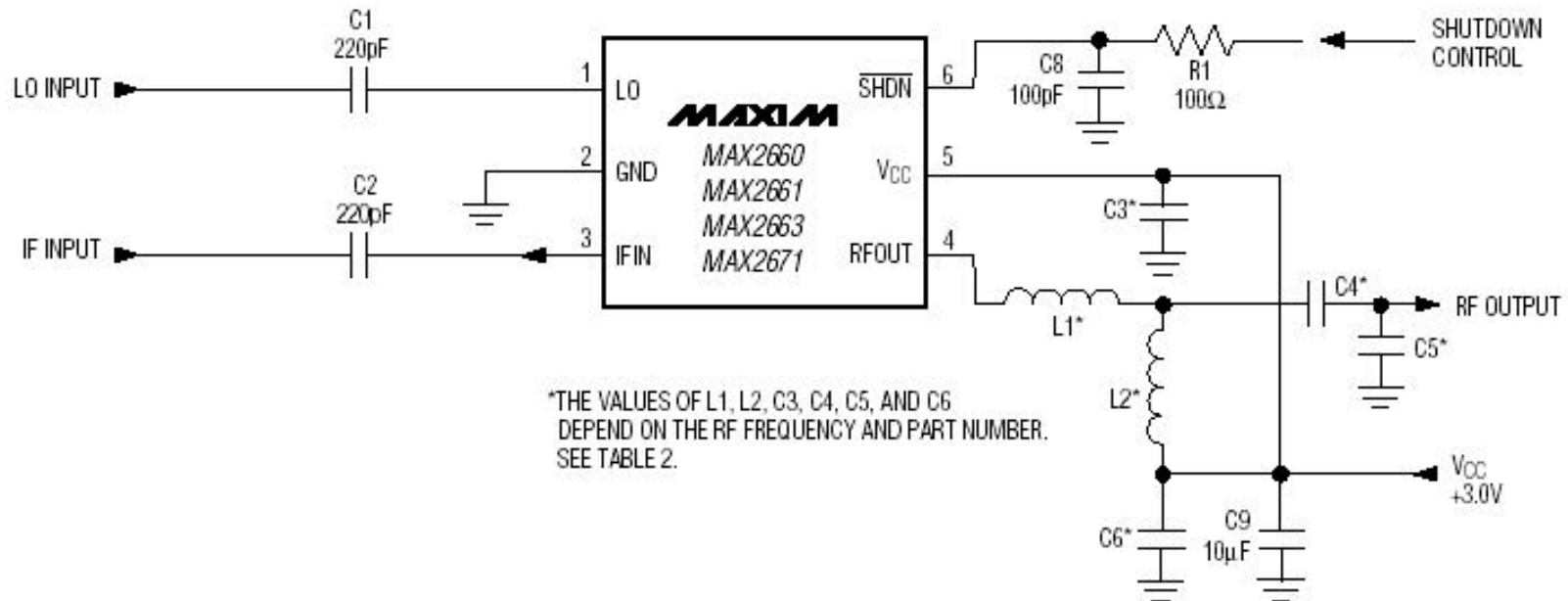
MAX2671

- 400MHz to 2.5GHz **Upconverters**
- KEY FEATURES :
 - RF Output Frequencies: 400MHz to 2.5GHz ;
 - Conversion Gain AT 2450MHz : 8.9dB ;
 - Low Noise Figure: 9.3dB (900MHz, MAX2671) ;
 - +2.7V to +5.5V Single Supply ;
 - High Output Intercept Point (OIP3) : 9.6dBm at 11.8mA (MAX2671) ;
 - 1 μ A Shutdown Mode ;
 - Ultra-Small Surface-Mount Packaging.

Typical Operating Circuit

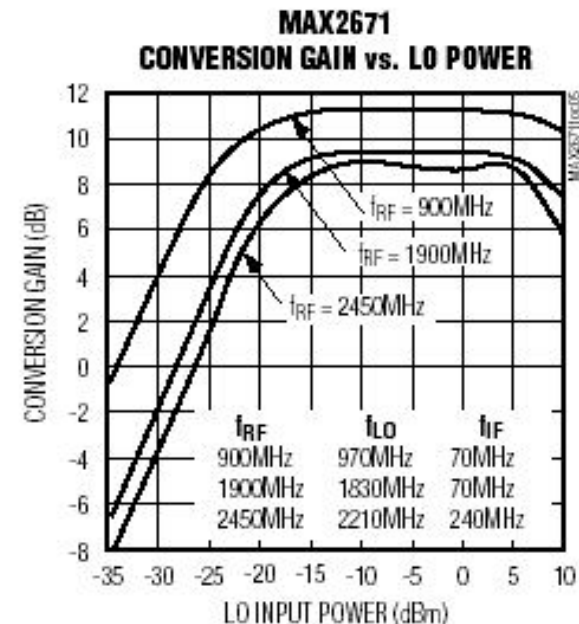
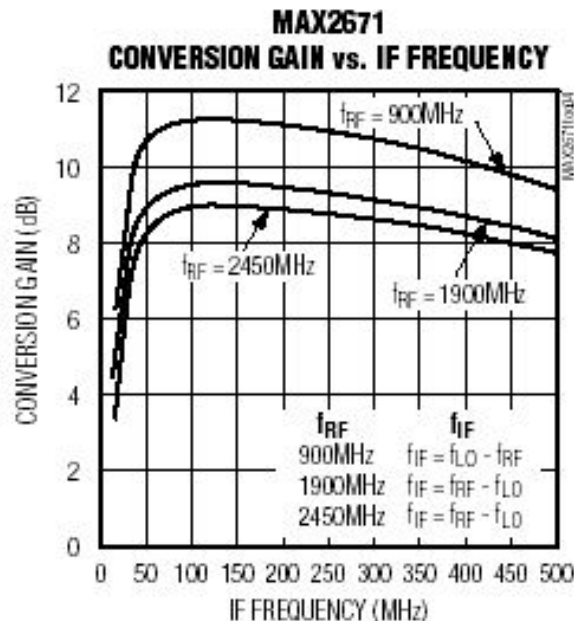
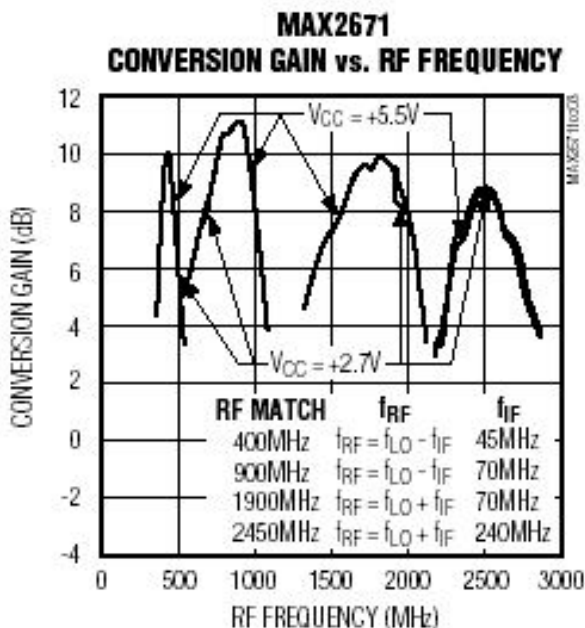
■ Typical Operating Circuits

- $V_{CC} = +3.0V$, $P_{IFIN} = -30dBm$,
- $P_{LO} = -5dBm$ (MAX2660/MAX2661/MAX2663),
 $P_{LO} = -10dBm$ (MAX2671/MAX2673),
- $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.



MAX2671 Conversion Gain

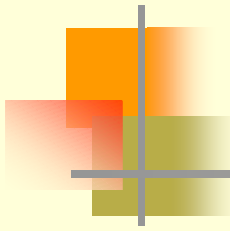
- Conversion Gain vs RF Frequency ($V_{CC}=+2.7V$, $+5.5V$)
- Conversion Gain vs IF Frequency ($f_{RF}=900MHz$, $1900MHz$, $2450MHz$)
- Conversion Gain vs LO Input Power ($f_{RF}=900MHz$, $1900MHz$, $2450MHz$)





12.7 调制解调器主要技术指标及其测试方案

- I and Q Signal Bandwidth
- I/Q Amplitude Match
- I/Q Phase Match
- Sideband Rejection
- LO Leakage at Output

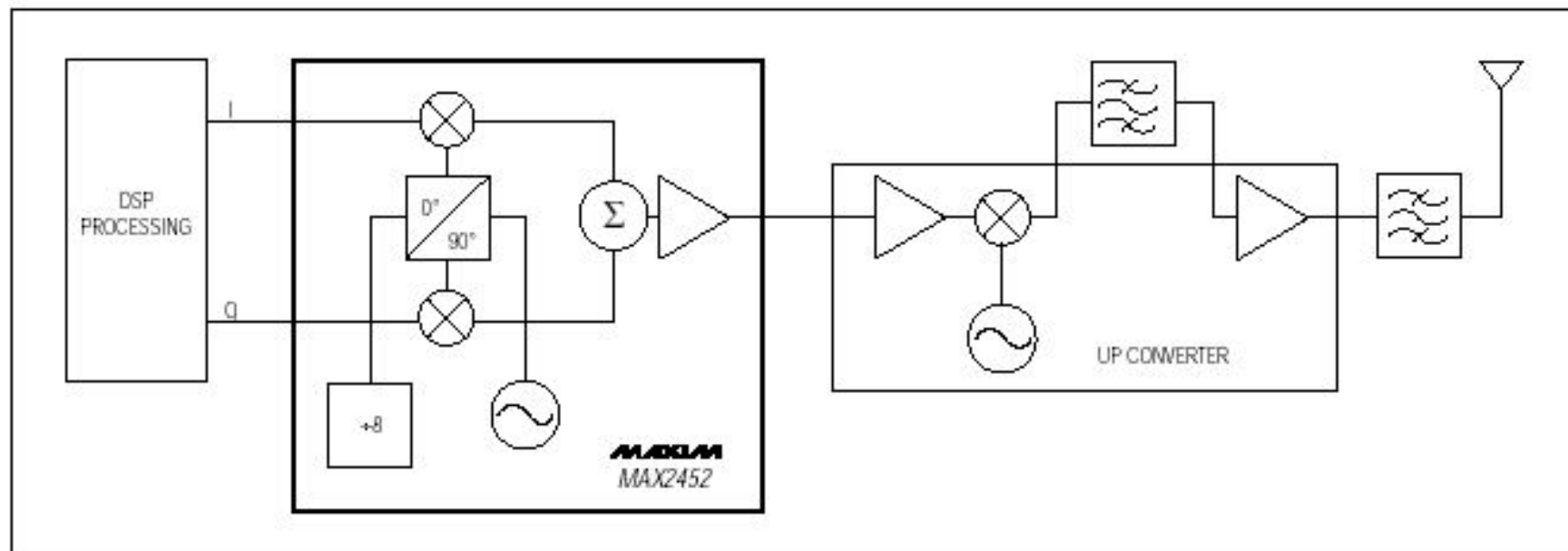


MAX2452

- 70MHz Ultra-Low-Power Quadrature Modulator
- KEY FEATURES :
 - IF Output Frequency up to 80MHz, 65 mVp-p ;
 - Input I and Q Signal Bandwidth up to 15MHz ;
 - I/Q Amplitude Match $< \pm 0.3\text{dB}$;
 - I/Q Phase Match $< \pm 3$ degrees ;
 - LO Leakage at Output -36dBc ;
 - On-Chip Oscillator with External Tuning Circuit (70 to 160 MHz) ;
 - On-Chip Divide-by-8 Prescaler ;
 - Sideband Rejection 42dB;
 - Self-Biased Differential Baseband Inputs.

Typical Operating Circuit

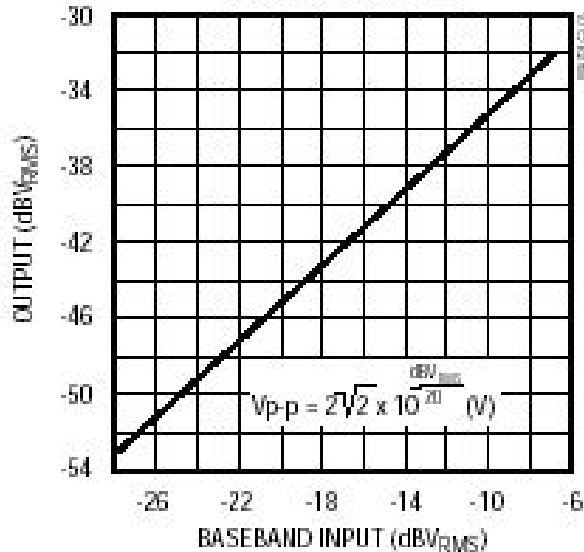
MAX2452



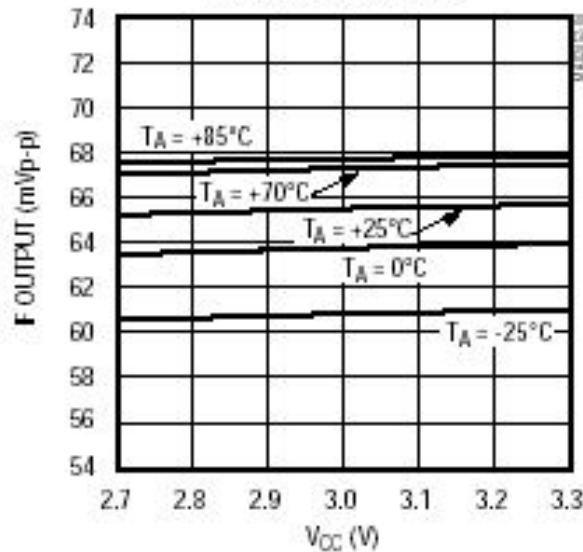
Typical Application Block Diagram

MAX2452 IF Output

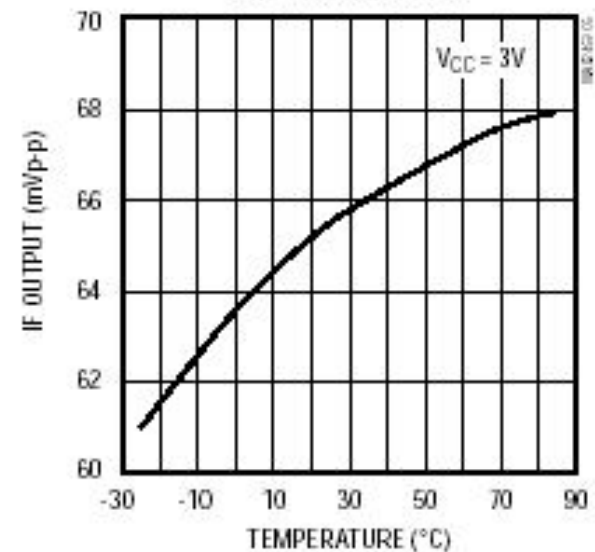
IF OUTPUT
vs. BASEBAND INPUT



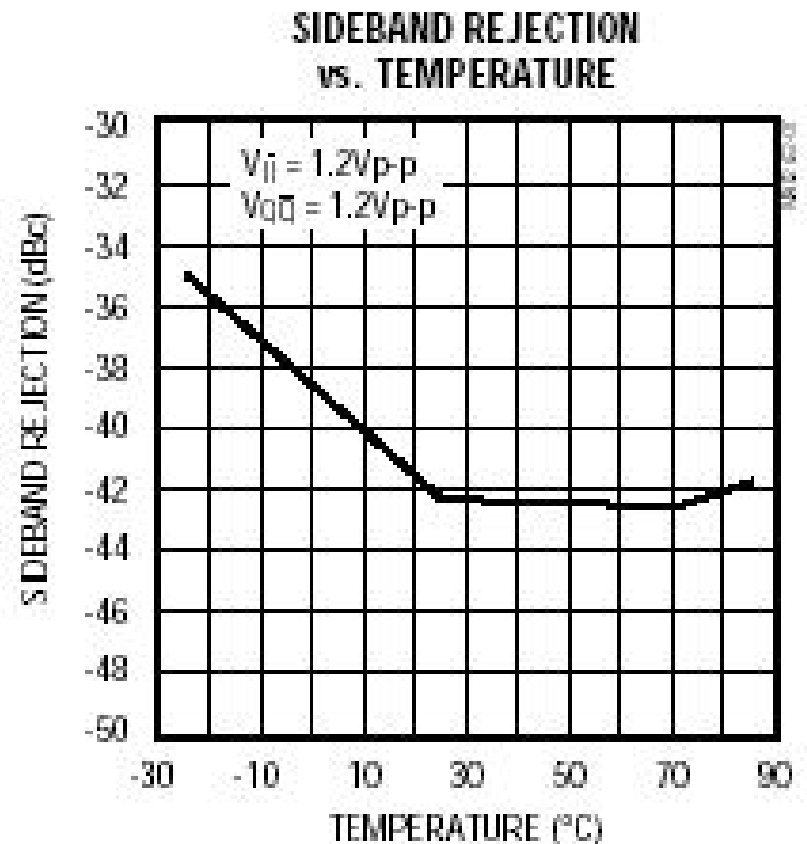
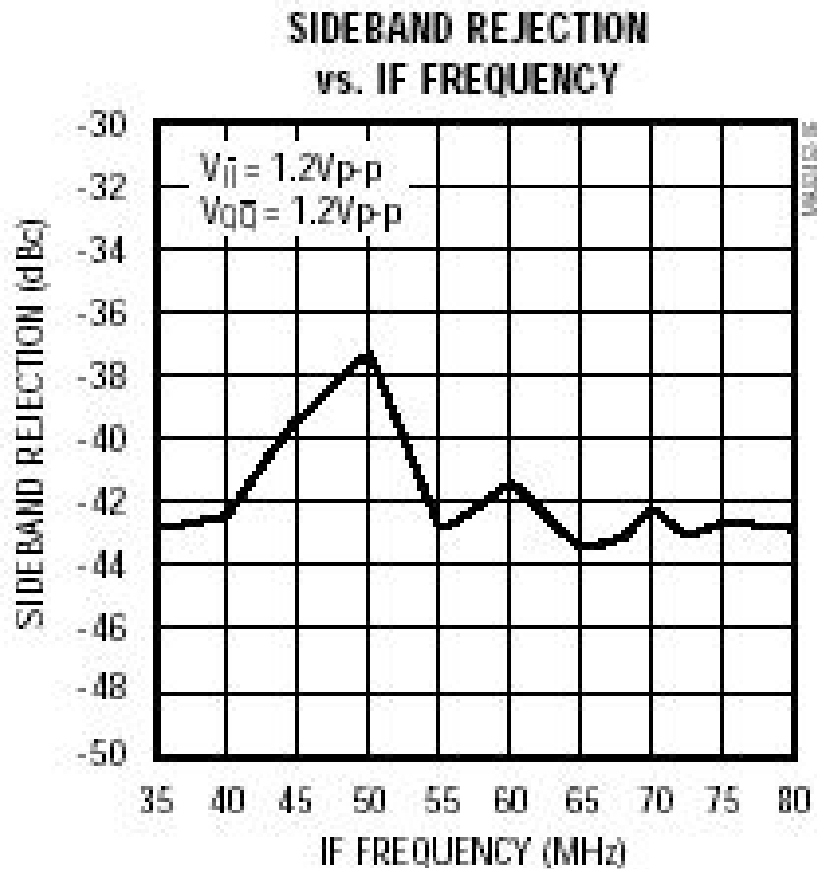
IF OUTPUT
vs. SUPPLY VOLTAGE



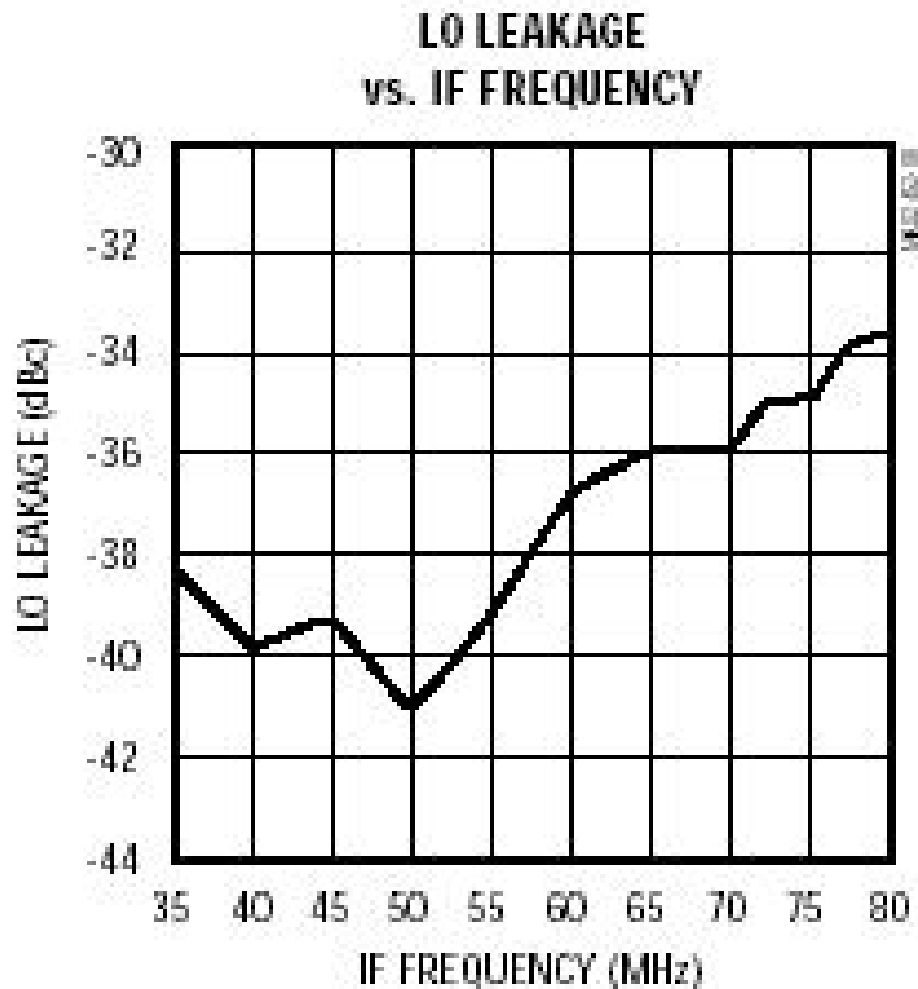
IF OUTPUT
vs. TEMPERATURE



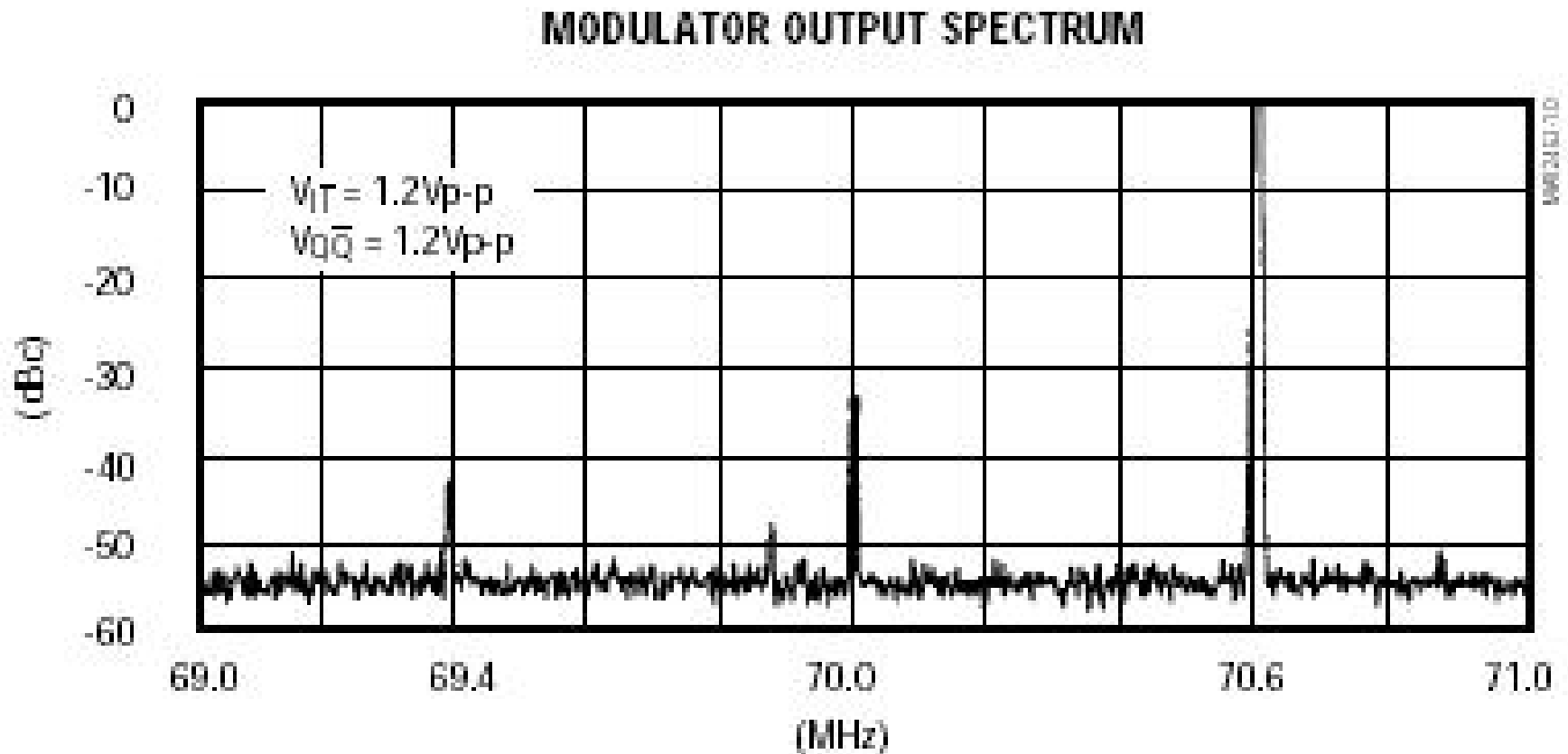
MAX2452 Sideband Rejection



MAX2452 LO Leakage

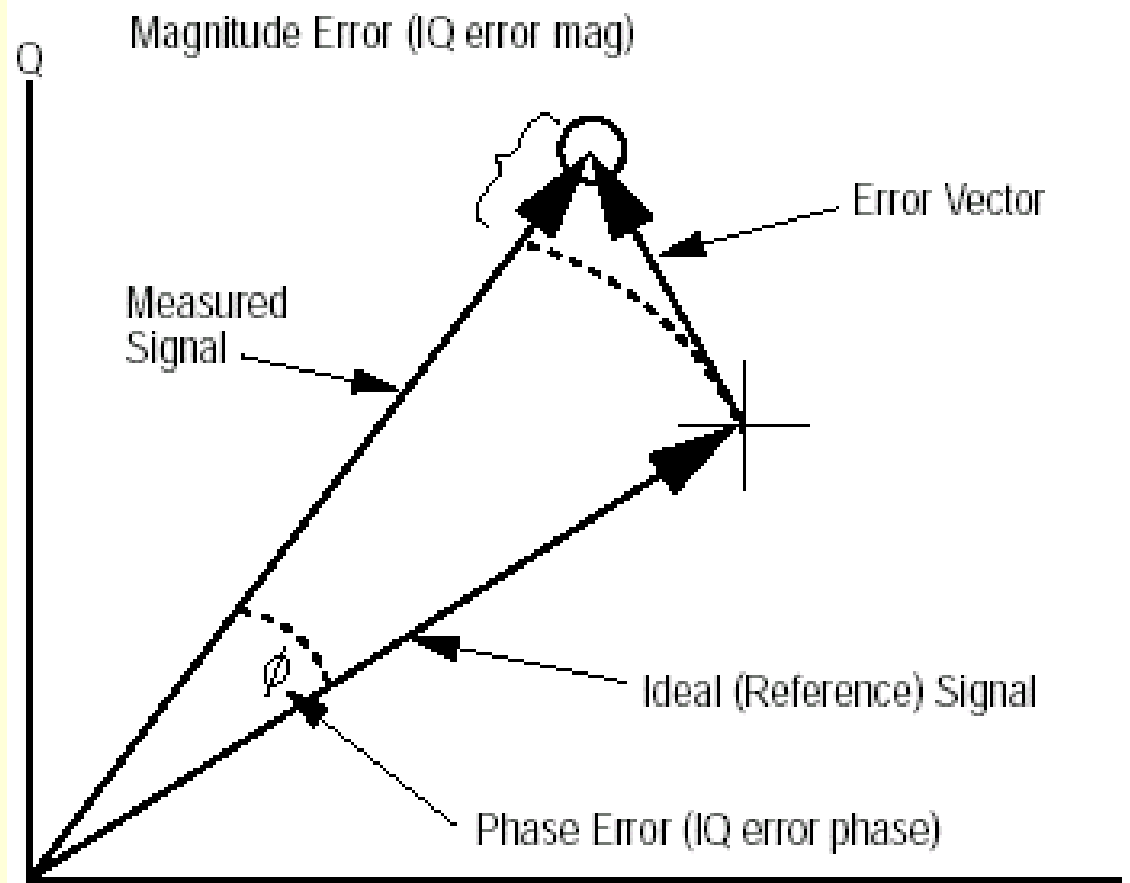


MODULATOR OUTPUT SPECTRUM



EVM测量

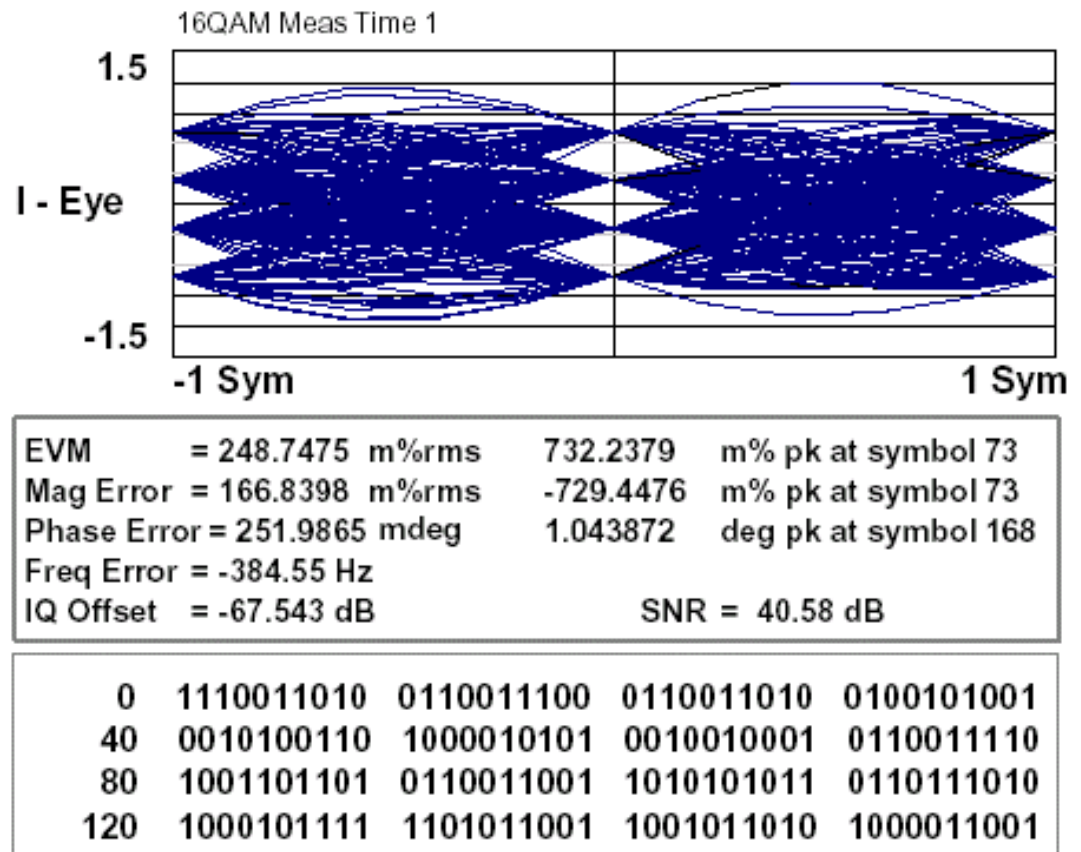
- EVM就是在所利用的调制格式下，实际的码元I、Q位置与理想的码元I、Q位置的差别。
- 利用EVM测量可以评价整个通信系统的性能，也可以了解个别元件（例如：滤波器、功放等）的作用。



Error vector magnitude (EVM) and related

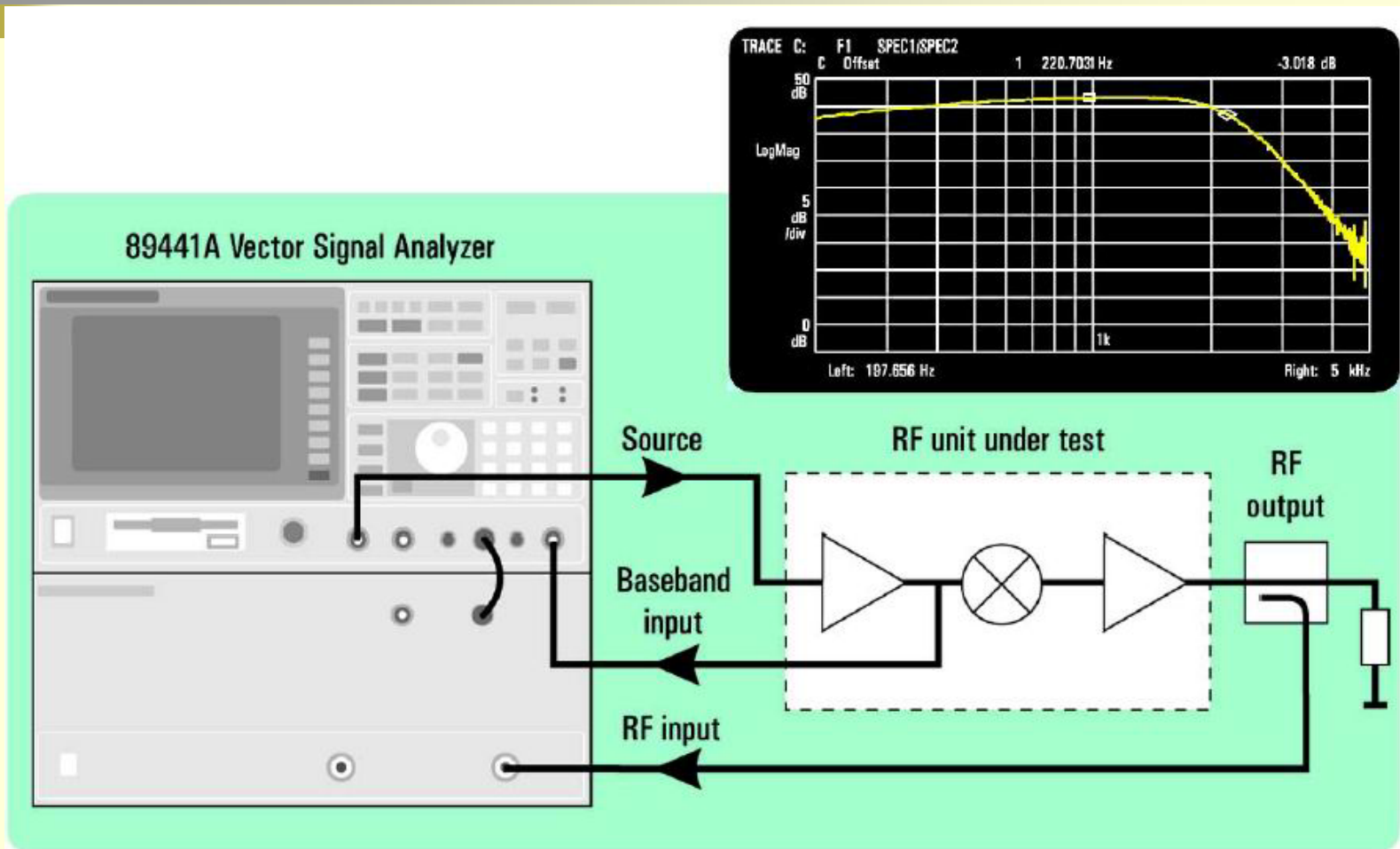
EVM测量 (续1)

- 通常情况下，相位误差与幅度误差是近似相等的。
- 假如平均相位误差（以度表示）远大于（五倍以上时）平均幅度误差（以峰值的百分比表示），这表示未知的相位调制成为支配的误差模式；
- 假如平均幅度误差远大于平均相位误差，则有明显的剩余幅度调制。



Data table (lower display) showing roughly similar amounts of magnitude and phase error. Phase errors much larger than magnitude errors would indicate possible phase noise or incidental PM problems

传输函数测量



12.8 电子测量自动化

- 计算机科学和大规模集成电路技术的发展，为测试自动化准备了最重要的条件。
- 六十年代，在系统中采用了电子计算机以后，就已经构成比较完善的自动化测试系统，常见的**第一代自动测试系统**主要有数据自动采集系统、产品自动检验系统、自动分析及自动监测系统等等；
- 七十年代，自动测试系统解决了标准化的**通用接口总线**问题，进而使自动测试进入了目前应用最广泛的**第二代自动测试系统**，系统中的各种设备，包括计算机、可编程仪器、可控开关等均统称为器件或装置(device)，各器件均配以标准化的接口功能电路，用统一的无源总线联接起来；
- **第三代自动测试系统**和计算机更紧密地结合起来，融为一体，它就是**虚拟仪器VI** (Virtual Instrument) 技术。虚拟仪器就是通用计算机上的一组软件和硬件，使用者操作计算机就像是操作一台传统电子仪器。



在自动测试中接口标准的发展

- RS232C ;
- GPIB : (General Purpose Interface Bus) ;
- VXI : (VMEbus eXtensions for Instrumentation) ;
- LAN ;
- USB。



在自动测试中的应用软件

- 在GPIB中有：**可编程的仪器命令集SCPI**（Standard Commands for Programmable Instruments）和**I/O程序库VISA/SICL**（Virtual Instrument System Architecture /Standard Instrument Control Library）；
- 在VXI中，现在已经开发出可视化编程语言用于自动化测试，其代表产品有：
 - Agilent公司的**VEE**；
 - NI公司的**LabWindows/CVI**及**LabView**等。
- 可视化自动测试技术充分发挥了计算机的图形功能，将仪器控制、数据分析等自动测试软件设计都采用“可视化”实现，以提高开发效率。



12.9 GPIB总线标准

- GPIB总线标准的历史沿革
- GPIB仪器的连接方法和工作方式
- GPIB系统连接的基本配置要求
- GPIB接口的基本特性
- GPIB的接口功能
- 数据传输的三线挂钩方式
- 可编程的仪器命令集SCPI
- Agilent GPIB卡和转换器



GPIB总线标准的历史沿革

- 1965年，惠普公司（HP）设计出HP-IB仪器接口总线，用于将其自行设计生产的一系列可编程仪器与计算机进行连接；
- 1975年，美国电气与电子工程师协会（IEEE）采纳了HP-IB技术并将其加以推广。1978年，IEEE颁布了标准文件IEEE std 488-1978，又称为GPIB（General Purpose Interface Bus）总线标准（GPIB是24针接口）；
- 1979年，国际电工委员会（IEC）承认了这种接口系统，颁布了IEC-625-79和IEC-625-80两个标准文件（IEC-625是25针接口）；
- 1984年，我国颁布了ZBY207.1-84和ZBY207.2-84两个文本作为标准；
- 1987年，IEEE488-1978标准提升为IEEE488.1-1987，全称是“用于可编程仪器的IEEE标准数字化接口”；
- 但是，IEEE488.1-1987标准仍存在不足。为此，IEEE 又同时建立了IEEE488.2-1987标准；
- 1990年4月公布的可编程的仪器命令集SCPI则解决了器件的标准化；
- 1992年，IEEE488.2-1987标准又进行了新一轮的修改，变更成为IEEE488.2-1992标准。

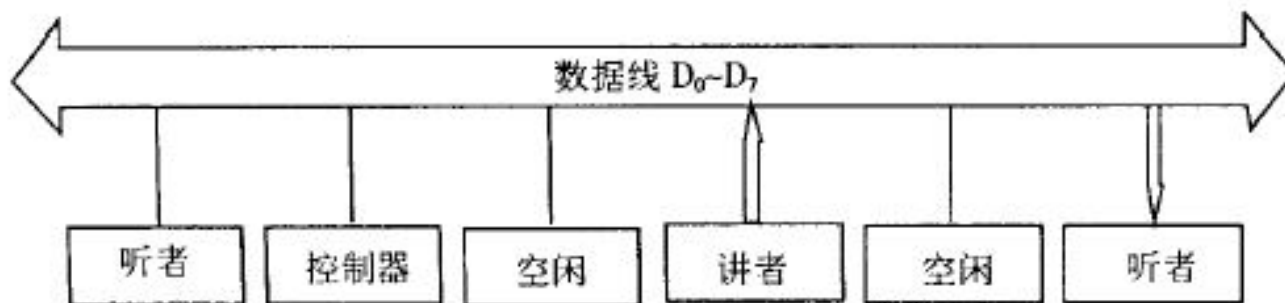


GPIB仪器的连接方法和工作方式

- GPIB总线一共由16根线组成（未包括8根地回线），其中有8根数据线DB0 to DB7，3根握手线（NRFD、DAV、NDAC），5根总线控制线（ATN、SRQ、IFC、REN和EOI）；
- GPIB总线是一种采用异步数据传送方式的双向总线；
- GPIB总线上的信息按位（bit）并行、字节（byte）串行的方式传送。所以称为位并行，字节串行。

GPIB系统连接的基本配置要求

- 如下图所示，设备可以处于以下任何一种角色之中或者同时扮演几种角色：
 - 空闲（IDLE），什么事也不做；
 - 听者（LISTENER），从讲者处接收信息；
 - 讲者（TALKER），向一个或多个听者发送数据；
 - 控制器（CONTROLLER）。
- 可以有任意数量的设备处于空闲或听者状态中，但是在某一时刻只能有一个讲者和控制器。
- 讲者和控制器的角色可以在设备之间传递，每一个设备在总线上的地位是经常变化的。



GPIB 总线系统示例

GPIB接口的基本特性

- (1) 接口功能共有十种，见下述；
- (2) 最大设备数量是15个，受发送器负载能力的限制；
- (3) 联接方式：总线式联接，仪器直接并联在总线上，相互间可以直接通讯；
- (4) 总线构成：共24根线，16根信号线（其中8根为数据线，3根挂钩（Handshake）线，5根总线控制线）；
- (5) 地址容量：听讲31个地址；
- (6) 数传方式：位并行，字节串行，双向异步传输；
- (7) 最大电缆长度20m，设备间隔最大4m，平均2m；
- (8) 数传速度：一般可达250 ~ 500kb/s，最高可达1MB/s；
- (9) 控制转移：若系统有多个控者，则可根据测试要求，在某一时间内选择某个控制器起作用；
- (10) 消息逻辑：在总线上采用负逻辑，即高电平为“0”，低电平为“1”。



GPIB的接口功能

- 可看到GPIB仪器后面板IEEE488接口附近标有如下字符：SH1，AH，T5，L3，SR1，RL1，C0，其意义是说明该GPIB仪器所具有的**接口功能子集**；
- GPIB标准中规定了**十种接口功能**，分述如下：
 - 讲者功能（T、TE）；
 - 听者功能（L、LE）；
 - 源挂钩功能（SH）；
 - 受者挂钩功能（AH）；
 - 控者功能（C）；
 - 服务请求功能（SR）；
 - 并行点名功能（PP）；
 - 远控 / 本控功能（R/L）；
 - 仪器触发功能（DT）；
 - 仪器清除功能（DC）。



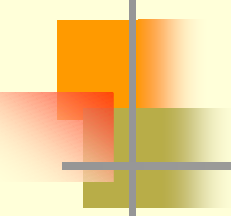
1. 讲者功能

- 讲者功能（Talker Function）简称为讲功能（T功能）；
- 它将仪器的测量数据或状态字节，程控命令或控制数据通过接口发送给其它仪器，只有控者指定仪器为讲者时它才具有讲功能；
- 在具有双重地址的仪器接口中，还要设置扩展讲功能（Extended Talker Function）：简称 TE功能。



2. 听者功能

- 听者功能（Listener Function）简称为听功能（L功能）；
- 它从总线上接收来自系统中由控者发布的程控命令或由讲者发送的测量数据，只有当该仪器被指定为听者时才能从总线上接受消息；
- 系统中所有仪器都必须设置听功能。在具有双重听地址的仪器接口中，还要设置扩展听者功能（Extended Listener Function）：简称为 LE功能；
- 讲者功能和听者功能只解决了系统仪器之间发送和接收数据的问题，要保证数据准确可靠的传送，必须要在仪器之间设置联络信号，为此，GPIB标准采用了三线挂钩技术，分别设置了源功能和受劝能。



3. 源挂钩功能

- 源挂钩功能（Source Handshake Function）简称为SH功能；
- 它用来在数据传输过程中源方向受方进行联络，以保证多线消息的正确可靠传送；
- 当讲者把数据送到数据线上时，源方用它向总线输出“数据有效”消息，并检测受方通过总线送来的“未准备好接受数据”消息和“未接收到数据”消息的挂钩信号线。
- 源功能是讲者和控者必须配置的一种接口功能。



4. 受者挂钩功能

- 受者挂钩功能（ Accenter Handshake Function ）简称为AH功能；
- 它赋予仪器能够正确接收多线消息的能力。在数据传输过程中，受方向源方进行挂钩联络用的；
- 用它向总线输出‘未准备好接收数据’消息和“未接收到数据”消息，并检测由源方发来的“数据有效”信号线上的挂钩联络信号；
- AH功能是系统中所有听者必须配置的一种功能。



5. 控者功能

- 控者功能（Controller Function）简称为C功能；
- 该功能产生对系统的管理消息，接受各种仪器的服务请求和状态数据；
- 它担负着系统的控制任务，发布各种通用命令，指定数据传输过程中的讲者和听者，进行串行或并行点名等。



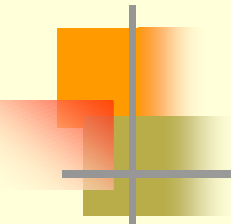
6. 服务请求功能

- 服务请求功能（Service Request Function）简称为SR功能；
- 它是仪器向控者发出服务请求的信息。仪器请求服务有两种情况：
 - 一是测量仪器已获得测量数据并存放于输出寄存器中，请求向总线输出测量数据；
 - 另一种是系统在运行中，某些仪器出现硬件或软件的故障，请求控者进行处理；
 - 在进行软件开发的时候，“写”到仪器的程控码不对，或是语法错误均会出现仪器前面板SRQ灯亮，这时通过程序读出Error编号，查找错误原因，加以纠正。



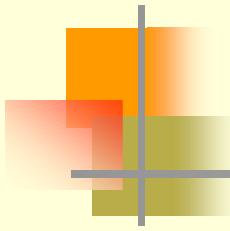
7. 并行点名功能

- 并行点名功能（Parallel Poll Function）简称为PP功能；
- 它是控者为快速查询服务而设置的点名功能；
- 在并行点名时，只有配置PP功能的仪器才能作出响应。



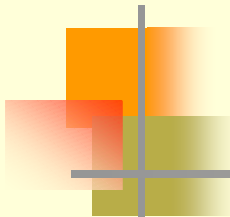
8. 远控 / 本控功能

- 远控 / 本控功能 (Remote / Local Function) 简称为R/L功能；
- 仪器接收总线发来的程控命令称为远控，接收面板按键人工操作称为本控；
- 一台仪器任何时候只能有一种控制方式，或者远控，或者本控；
- 控者可以通过总线使配置有R / L功能的仪器在本控和远控之间随意切换。



9. 仪器触发功能

- 仪器触发功能（Device Trigger Function）简称为DT功能；
- 它能使仪器从总线接收触发消息，进行触发操作。



10. 仪器清除功能

- 仪器清除功能（Device Clear Function）简称为DC功能；
- 系统中的某些仪器功能可单独或有选择被清除，使其回到某种指定的初始状态，这种操作称为仪器清除；
- 一台仪器应该配置哪些接口功能应根据具体仪器的工作性质，有选择的配置必需的接口功能。

数据传输的三线挂钩方式

- 三根握手线以异步的方式控制设备间的信息传输,它们分别是:
 - 尚未准备接收数据—NRFD(Not Ready For Data);
 - 尚未接收数据—NDAC(Not Data Accepted);
 - 数据有效—DAV(Data Valid)。
- NRFD信号用来指示设备是否已做好接收数据的准备, NDAC信号则用来指示设备是否已收到数据。
- 控制设备发出命令时,所有设备的NRFD信号和NDAC信号都有效;
- 而当讲设备发送数据时,只有听设备的NRFD信号和NDAC信号才有效;
- DAV信号用来指示数据线上的信号是否已经稳定,以保证设备能正确接收数据。当控制设备发出命令或当讲设备发送数据时,都会使DAV信号有效。



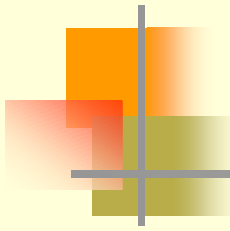
可编程的仪器命令集SCPI

- SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) 即可编程仪器标准命令；
- SCPI标准于1990年提出，SCPI要求遵循这一标准的仪器命令集要与IEEE488.2标准相符合；
- SCPI是一个纯粹的软件标准，SCPI独立于硬件，SCPI字符串可以通过任何仪器接口发送，无论是GPIB、RS232、VXIbus还是局域网，都可以工作得同样好。



仪器命令集SCPI的特点

- SCPI方便易学，在掌握一种仪器的命令集之后很容易掌握其它仪器的命令集，因为它们有很多相似性。
- 这种相似性体现在两个层面：
 - 在垂直层面上，同一类型的仪器命令集相似，例如不同数字万用表读取直流电压的命令是一致的；
 - 在水平层面上，不同类型仪器之间，同种功能的SCPI命令也一致，例如示波器、函数发生器的触发命令是一样的。
- SCPI的独特设计，使得它可以不断扩展而不会引起编程问题。随着新型仪器的出现，新的命令集会加入进来。



程控命令的基本结构

- 公用命令：IEEE 488.2定义的公用命令，与测量无关，用来管理宏、状态寄存器、同步和数据存储，都是以“*”开始；
- 程控信息：程控信息是几个SCPI命令的组合，是由控制器到仪器，告诉仪器干什么并输出信号；
- 响应信息：响应信息总是由仪器到控制器（或听仪器），告诉控制器有关仪器的内部状态和测量数值；
- 命令：仪器的SCPI命令，通常包括关键词、参量和标点符号；
- 询问：询问是特殊的命令，通知仪器给控制器发响应数据。



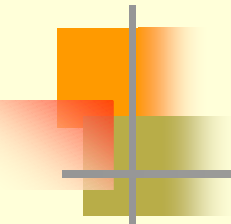
IEEE 488.2定义的公用命令

- *CLS (Clear Status) ;
- *ESE (Standard Event Status Enable) ;
- *ESR? (Standard Event Status Register) ;
- *IDN? (Identification) ;
- *OPC (Operation Complete) ;
- *OPC? (Operation Complete) ;
- *RCL (Recall) ;
- *RST (Reset) ;
- *SAV (Save) ;
- *SRE (Service Request Enable) ;
- *SRE? (Service Request Enable Query) ;
- *STB? (Read Status Byte) ;
- *TRG (Trigger) ;
- *TST? (Self-Test) ;
- *WAI (Wait-to-continue)。



SCPI 命令集举例

- SCPI 命令集举例 (Tektronic TDS220 Oscilloscope) :
 - IDN ? - 返回仪器 (示波器) 标识 , 采用 IEEE488 标记法 ;
 - CH<x>:PRObe ? - 查询通道 x 的探头衰减 ;
 - HARDCopy:FORMat BMP - 设置硬拷贝格式为 Windows 位图 (BMP) 。
- SCPI 的语句以 ASCII 文本的方式存在 , 因此可以加入到任何计算机测试程序编程语言之中 ;
- 目前可以得到的最新 SCPI 标准是 SCPI - 1999。



Agilent GPIB卡和转换器

- 82350B: PCI高性能GPIB卡, I/O程序库VISA/SICL, 接口IEEE488、5V PCI;
- 82357A: USB/GPIB接口连接到计算机的端口上, I/O程序库VISA/SICL, 接口USB1.1;
- E5810A: LAN/GPIB网关可以远程访问和控制GPIB仪器, I/O程序库VISA/SICL, 接口10BASE-T/100BASE-TX。



12.10 VXI总线系统简介

- VXI总线
- VXI总线的结构
- VXI总线的控制
- VXIplug&play系统联盟
- 虚拟仪器软件架构VISA
- 标准仪器控制库SICL
- Agilent公司的VEE



VXI总线

- VXI (VMEbus eXtensions for Instrumentation) 是VME总线在仪器领域的扩展；
- 目前,国际上有两个VXI 总线组织. 一个是VXI总线联合体,负责VXI总线标准规范的制定;另一个是VXI总线即插即用(VXI Plug & Play, 简称VPP) 系统联盟;
- VME总线是为微机和某些数字系统设计的, 没有考虑仪器的特点, 比如仪器模块尺寸通常比较大, 需要更好的屏蔽等等。
- 为配合仪器控制的特点, HP、Tektronic等公司在1987年共同制定了VXI标准, 这一标准以VME总线为基础, 并吸取了GPIB的易于组合等优点;
- VXI总线的国际标准为IEEE-1155, 其硬件为组配自动测试系统提供了极大的方便, 软件系统则采用了两个软件标准即IEEE488.2和可编程序仪器标准指令SCPI。

VXI总线系统规范简介

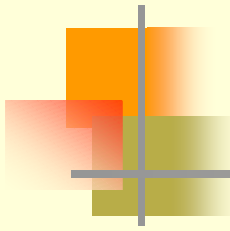
- VXI总线系统或者其子系统由一个VXIbus主机箱、若干VXIbus设备、一个VXIbus零槽模块、VXIbus资源管理器和主控制器组成：
 - 零槽模块完成系统背板管理，包括提供时钟源和背板总线仲裁等，当然它也可以同时具有其它的仪器功能；
 - 资源管理器在系统上电或者复位时对系统进行配置，以使系统用户能够从一个确定的状态开始系统操作。在系统正常工作后，资源管理器就不再起作用。
- VXI总线最多可以包含256个设备，并且每一个设备都有其唯一的逻辑地址单元。这是系统的基本逻辑成分。
- VXI总线系统的模块和特制的主机箱，都可按从小到大分为A、B、C、D 四种尺寸，各个模块分别插入主机箱的插槽中。
- 以每个主机箱为单位构成了一个VXI子系统，每个子系统最多可以放置13个模块。
- 主机箱的背板为多层印制电路板，其上印制着VXI总线。模块与VXI总线间通过连接器进行连接。

VXI总线的控制

■ VXI总线的控制方式有两种：

- 一种是在主机箱内嵌入内部控制器，以获得较高的传输速度；
- 另外一种是采用GPIB、RS232、MXIbus、VME 或局域网等与外部控制器（如计算机）进行连接。
- 这样，在控制器看来，与其连接的并非是VXI仪器而是其它总线的仪器。

- 在利用外部控制器进行VXI仪器控制时，如果通过GPIB或RS232与外部控制器（计算机）连接，一般会造成性能瓶颈。所以一般不用于大量的数据传输，只用于比较简单的仪器调试和控制命令的传送；
- “软件就是仪器”是虚拟仪器带给仪器工业的一次革命。虚拟仪器的硬、软件的开放性、模块化、可重复使用的特点，同时借助于VXI总线的系统结构这一构筑虚拟仪器的理想的平台，虚拟仪器系统必然会给现代控制测试领域带来一片新天地。



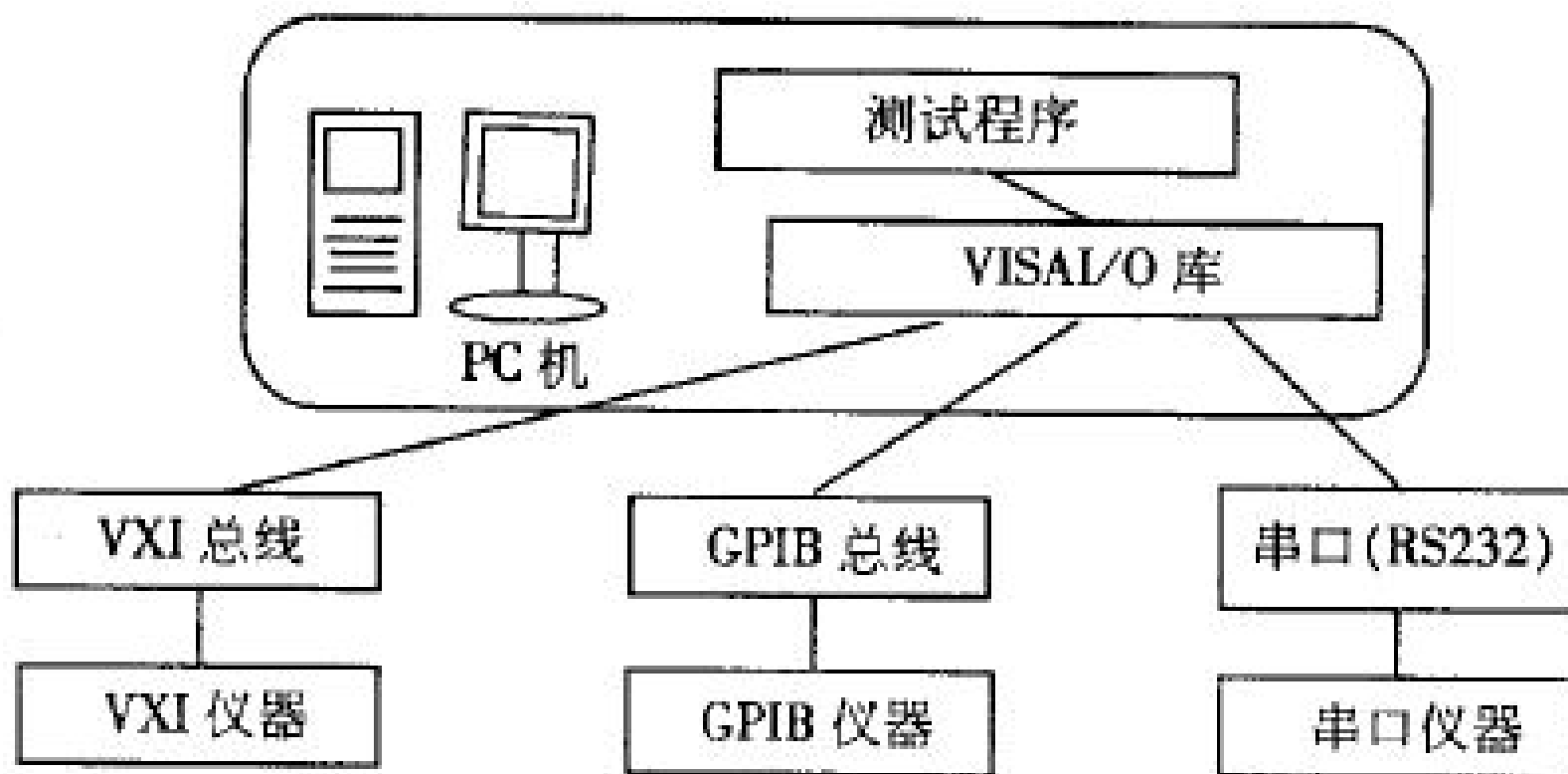
VXIplug&play系统联盟

- VXIplug&play系统联盟建立于1993年。该联盟的成员是在VXI产品和技术领域具有领先地位的大公司，包括HP、NI、Tektronic等。
- 该联盟致力于建立开放的多厂商系统，并已经通过签署和实现通用标准的方法，在软、硬件两方面提高了易用性，而不仅仅是针对VXIbus的。
- 这些标准同时在硬件和系统软件级别给最终用户真正的“即插即用”的互操作性。
- VISA（虚拟仪器软件架构，Virtual Instrument System Architecture）是VXIplug&play系统联盟的最重要的工作成果之一。

虚拟仪器软件架构VISA

- 参考：Agilent仪器说明书
\\82350A_GPIB_PCI_Card\Agilent VISA User's Guide for Windows_5188-5722.pdf
- VISA定义了新一代I/O接口软件规范，不仅适用于VXI接口，还可用于GPIB、串口（如RS232）和其它接口。包括Tektronic、HP以及NI在内的超过35家最大的仪器公司共同签署了这一标准。
- 下图中给出了VISA I/O库在测试程序中扮演的角色，它作为中间层，为应用程序和仪器总线的通信建立了通道。
- 其中，VXI仪器、GPIB仪器、串口仪器的说法只是将仪器就其与计算机不同的连接方式和接口加以分类，具体仪器实现什么功能（示波器还是函数发生器，或者是数字万用表等）并未加以考虑。
- 同一台仪器可以同时具有不止一种接口。例如一台数字示波器，同时具有GPIB和RS232接口。

VISA I/O库在测试程序中扮演的角色



VISA I/O 库在测试程序和仪器总线间的角色



标准仪器控制库SICL

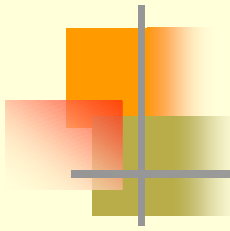
- 参考：Agilent仪器说明书
\\82350A_GPIB_PCI_Card\Agilent SICL User's Guide for Windows_E2094-90038.pdf
- SICL（标准仪器控制库，Standard Instrument Control Library）是适用于不同的I/O接口和系统，是由Agilent公司开发的；
- Using SICL with GPIB；
- Using SICL with GPIB；
- Using SICL with VXI；
- Using SICL with RS-232；
- Using SICL with LAN。



Agilent 公司的 VEE

- HP VEE 全称为 HP Visual Engineering Environment, 是 HP 公司开发的一套系统仿真与设备控制的可视化开发工具；
- 它对整个语言做了彻底图像化处理, 提供了模块式的编程工具, 只需要用鼠标连接各个图标就可以产生程序；
- 它还提供了数据流显示和程序流显示, 使程序的调试非常直观和形象；
- 此外, 它还在仪器控制方面同时提供了直观的软面板方式 (Instrument Panel) 和灵活的直接输入输出方式 (Direct I/O), 这两方面的特色使使用者能把更多的注意力投入到与应用有关的领域。HP VEE 是一种高功能的直观编程语言, 一般而言, 可降低 30% ~ 80% 的开发时间。

Agilent 公司 VEE的优点

- 
- (1) HP VEE支持Windows95、WindowsNT以及Windows3.1和UNIX基本操作系统的能力；
 - (2) 支持多种接口，包括：GPIB、VXI、Serial、GPIO、PC Plug-in、LAN -GPIB，VEE是VXI最好的编程软件平台；
 - (3) 支持非并行的I/O和联网功能，可以作为服务器或挂号的用户用；
 - (4) 支持集成语言标准，如C、C++、Visual Basic、HP Basic和FORTRAN，来优化和扩展应用开发过程，接口语言包括：DLLs、DDE、UNIX等；
 - (5) 具有丰富的网络接口，支持TCP/IP，Socket 以及基于Web的远程监控特性；
 - (6) HP VEE 还提供许多数学运算工具，有优异的界面设计功能及有丰富的显示方式；
 - (7) 它在仪器控制方面同时提供了直观的软面板方式 (Instrument Panel)和灵活的直接输入输出方式 (Direct I/O)。



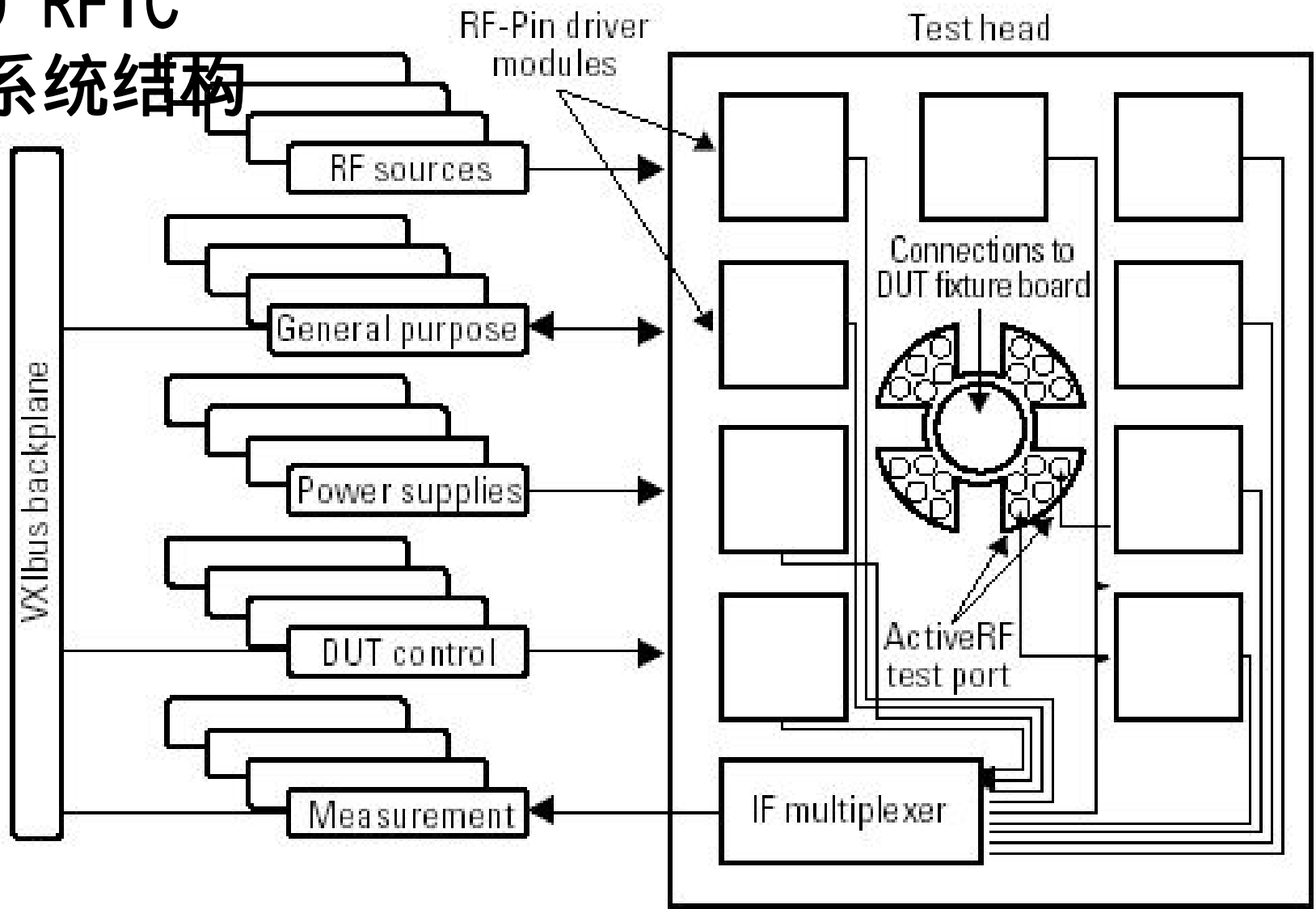
12.11 ATE自动测试系统

■ 安捷伦84000 RFIC自动测试系统

- 84000射频集成电路测试系统具有广泛升级空间的RFIC解决方案，具有2到12个RF测试端口，可以满足严格的市场需求，对于多功能RFIC、信号收发器、信号混合器、信号转换器（Mixer）、功率放大器（PA）和低噪声放大器（LNA）提供了完备的解决方案。
- 可以测试如噪声图、信号转换增益、双频三阶截取点、相邻信道能量隔离等多种参数

84000 RFIC

测试系统结构



The modular and open VXI architecture of the Agilent 84000 series allows test systems to be configured that have just-enough test capability.



第六次实验 典型射频芯片测试

- 典型射频芯片测试：
 - 滤波器（PF）；
 - 低噪声放大器（LNA）；功率放大器（PA）
 - 混频器（Down Mixer and Up Mixer）；
 - 振荡器（VCO）；
 - 调制解调器（I/Q Mod and Demod）。
- 频率变换器件的噪声测量（GPIB）；
- Agilent GPIB卡（82350A）I/O程序库VISA/SICL的使用。

第十二讲 典型射频芯片测试介绍 与测量仪器的程控(GPIB)小结

- 典型射频芯片的主要技术指标 (PF、LNA、PA、 Mixer、VCO、Modulator)。
- 典型射频芯片的测试方案 (ESG、OSC、PSA、VNA、NFA、VSA、LAS)。
- 测量仪器的程控(GPIB)：
 - GPIB总线标准；
 - 可编程的仪器命令集SCPI；
 - I/O程序库VISA/SICL；
 - Agilent GPIB卡和转换器；
- VXI总线系统简介：
 - 虚拟仪器软件架构VISA；
 - 标准仪器控制库SICL；
 - Agilent公司的VEE。
- ATE自动测试系统：举例 84000 RFIC自动测试系统。