

射频基础与测量

一、基本理论

- RF基本概念
- RF系统的构成
- 调制与解调

二、RF测量

- RF信号的测量
- RF系统的测量

三、测试仪器

培训达到的目的



- 1.熟悉射频基本概念.
- 2.了解射频基本测试方法.
- 3.对测试仪器有一定了解.

通信系统分类



按传输媒介

1. 有线通信系统
2. 无线通信系统

按调制方式

1. 模拟通信系统
2. 数字通信系统

常用的通信系统



频率范围	常用符号	用途
3Hz-30kHz	VLF (甚低频)	电话、长距离导航、时标
30kHz-300kHz	LF (低频)	导航、信标、电力线通信
300kHz-3MHz	MF (中频)	调幅广播、业余无线电
3MHz-30MHz	HF (高频)	短波广播、军用通信
30MHz-300MHz	VHF (甚高频)	电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航
300MHz-3GHz	UHF (特高频)	电视、空间遥测、雷达导航、移动通信
3GHz-30GHz	SHF (超高频)	微波接力、卫星和空间通信、雷达
30GHz-300GHz	EHF (极高频)	雷达、微波接力、射电天文学

音频范围 (AF)

$f < 1\text{MHz}$

微波范围

$f < 40\text{GHz}$

射频范围 (RF)

$f < 3\text{GHz}$

毫米波范围

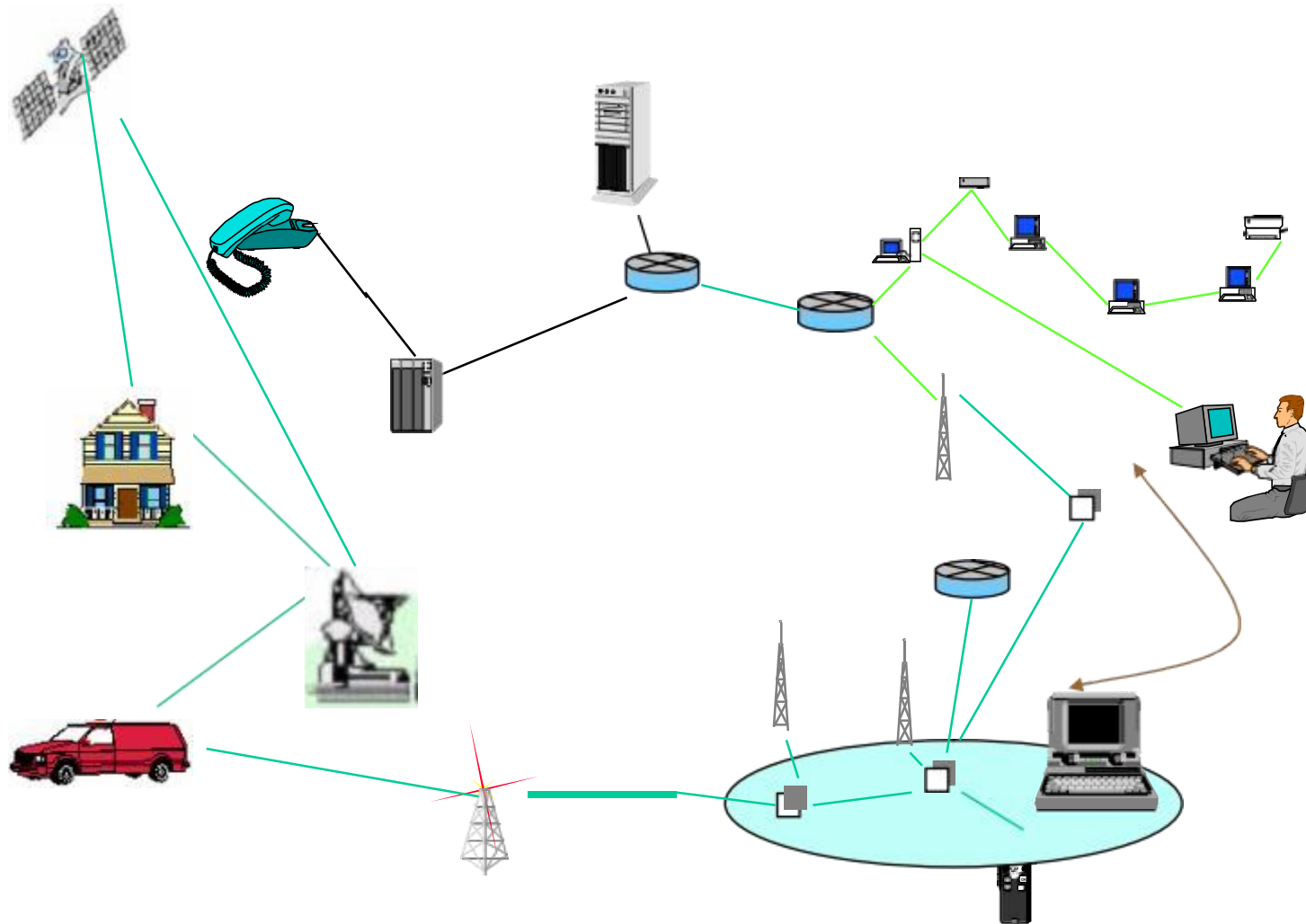
$f > 40\text{GHz}$

什么是RF?



- 1.RF,radio frequency,主要指发射的无线电波(又称射频),应用于无线通信。
- 2.RF有时称为高频,它是相对于低频而言。
- 3.RF的用途,主要是迅速而准确地传输信息,以克服距离上的障碍,是无线通信的关键技术,是传输信息的载体。

RF无处不在



RF应用于无线通信



- 1.AMPS、TACS
- 2.GSM/EDGE/GPRS
- 3.CDMA、WCDMA、TD-SCDMA
- 4.Bluetooth
- 5.WLAN 802. 11a/b/g(Wi-Fi)
- 6.WIMAX 802. 16
- 7.PHS
- 8.DECT
- 9.analog wireless communication,Walkie-talkie

RF信号是模拟的



- 1.无线数字通信系统采用数字调制方式.
- 2.无线模拟通信系统采用模拟调制方式.
- 3.无线通信系统不管是模拟还是数字的,RF信号是模拟的.

常用的微波波段代号



波段代号	标称波长 (cm)	频率范围 (GHz)	波长范围 (cm)
L	22	1—2	30—15
S	10	2—4	15—7.5
C	5	4—8	7.5—3.75
X	3	8—12	3.75—2.5
Ku	2	12—18	2.5—1.67
K	1.25	18—27	1.67—1.11
Ka	0.8	27—40	1.11—0.75
U	0.6	40—60	0.75—0.5
V	0.4	60—80	0.5—0.375
W	0.3	80—100	0.375—0.3

1.波长与频率成反比,C是光速, 等于 3×10^8 米/秒

$$c = \lambda * f$$

2.波具有直射/反射/绕射/衍射特性,频率越高,直射能力越强,频率越低,绕射能力强.

3.当天线可与波长相比拟时,发射效率越高.

4.RF是频率很高的波.

常用的工程量纲



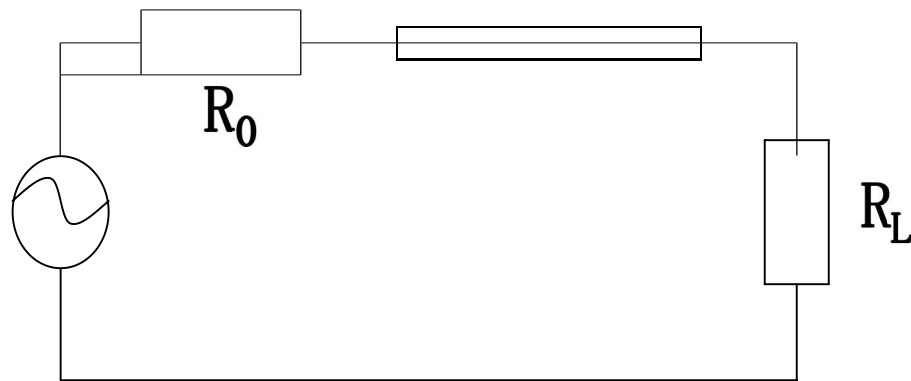
功率: $1\text{W}=10^3\text{mW}=10^6\text{ }\mu\text{W}$
 $\text{dBm}=10\lg(P/1\text{mW})$
 $\text{dB}=10\lg(P/P_{\text{ref}})$

电平: $1\text{V}=10^3\text{mV}=10^6\text{ }\mu\text{V}$

频率: $1\text{kHz}=10^3\text{ Hz}$
 $1\text{MHz}=10^6\text{ Hz}$
 $1\text{GHz}=10^9\text{ Hz}$

RF端口阻抗

- 1.通常RF电缆和端口为50欧姆
- 2.广播电视同轴电缆为75欧姆
- 3.当负载阻抗和输出阻抗相等时,能够得到最大功率传输
- 4.当端口之间阻抗不相等时,信号会发生反射



RF连接头



1. BNC，频率最高2GHz
2. N ， 频率最高18GHz
3. SMA ， 频率最高24GHz
4. 3.5mm ， 频率最高38.8GHz
5. 2.92mm ， 频率最高46.5GHz
6. Female,阴头或母头; Male,阳头或公头



ROHDE & SCHWARZ



BNC阳 - BNC阴



N阴 - N阴



N阳 - BNC阴



SMA阴

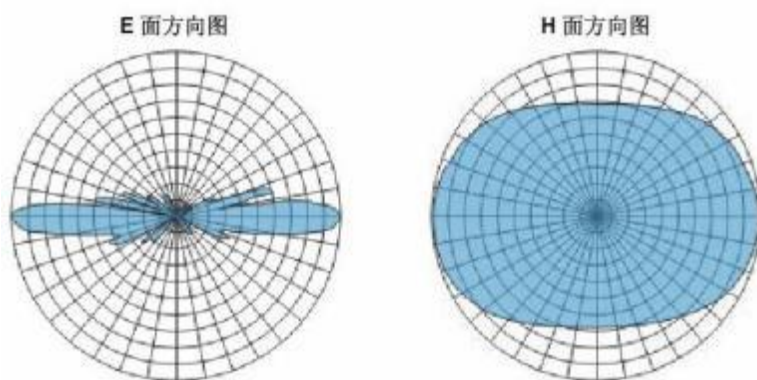


SMA阳 - SMA阳

射频与微波模块、元器件 ROHDE & SCHWARZ

1. 电阻R、电容C、电感L
2. 单端口器件（天线、吸收负载）
3. 双端口器件（滤波器、衰减器、放大器、移相器）
4. 多端口器件（混频器，耦合器，功分器/合路器、隔离器、双工器）

RF模块/天线



频带 Frequency Range(MHz)

1890-1920

增益 Gain(dBi)

7.5

驻波比 V.S.W.R

<1.4

极化 Polarization

垂直 Vertical

垂直波束宽度 Vertical-3dB Beamwidth(°)

20

预置电下倾角 Electrical Downtilt(°)

0

不圆度 Non-Circularity(dB)

±0.5

输入阻抗 Impedance(Ω)

50

雷电保护 Lightning Protection

直流接地 Direct Ground

最大功率 Maximum Input Power(W)

100



RF模块/合路器

性能指标:

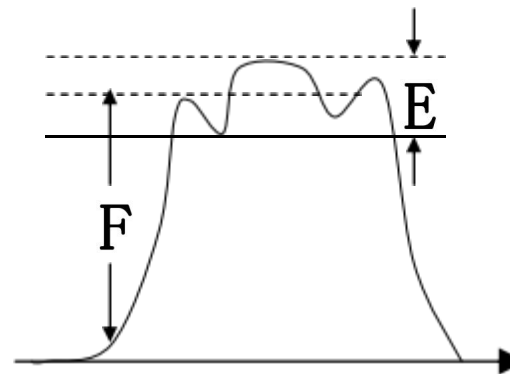
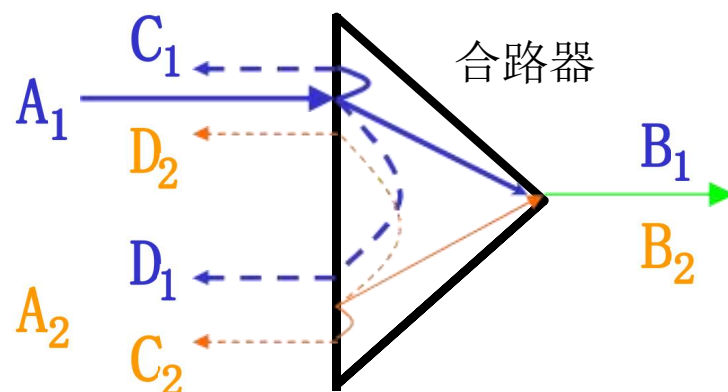
插入损耗: A_1-B_1

带内波动: E

带外抑制: F

端口回波损耗: A_1-C_1

隔离度: A_1-D_1



RF模块/放大器



1.低噪声放大器（LNA），位于接收机前端。

增益

噪声系数

带内失真

2.功率放大器（PA），位于发射机末级。

输出功率

线性度

带外杂散

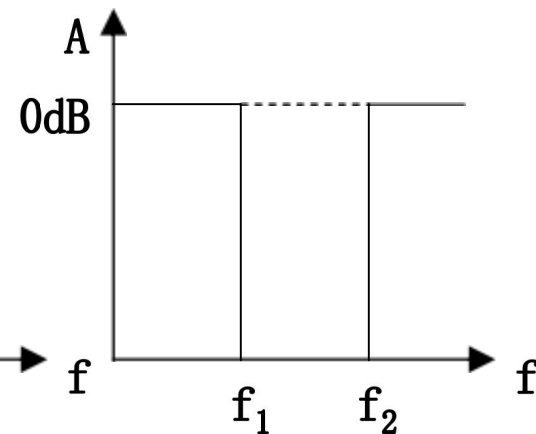
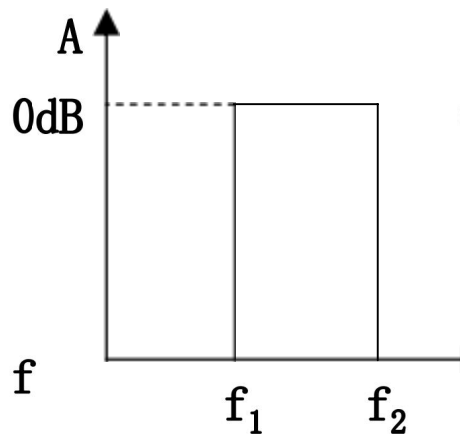
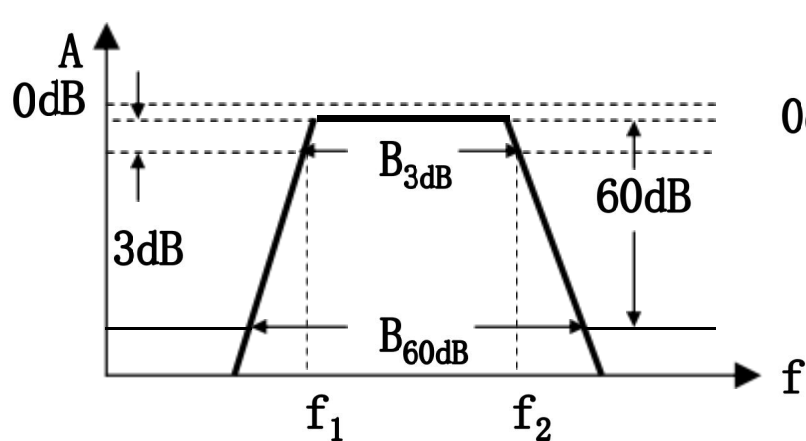
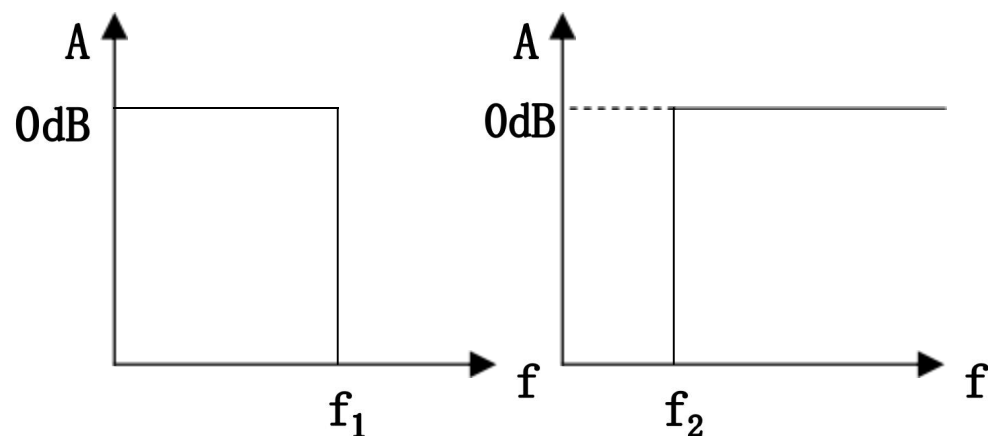
方向隔离度

RF模块/滤波器



1. 低通滤波器
2. 高通滤波器
3. 带通滤波器
4. 带阻滤波器

波形系数 $SF_{60/3} = B_{60dB} / B_{3dB}$



RF模块/定向耦合器

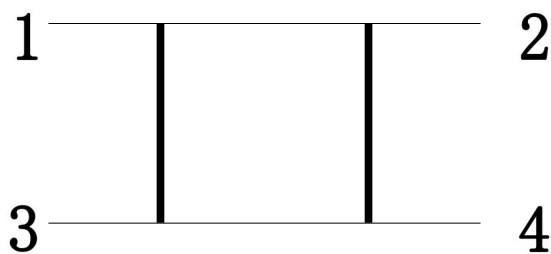


性能指标:

耦合度: 输入端的输入功率 P_i 与耦合端的输出功率 P_c 之比, 记为 $K_c = 10\lg (P_i/P_c)$

隔离度/定向性: 输入端的输入功率 P_i 与隔离端的输出功率 P_s 之比, 记为 $K_s = 10\lg (P_i/P_s)$

方向性: 耦合端的输出功率 P_c 与隔离端的输出功率 P_s 之比, 记为 $K_d = 10\lg (P_c/P_s)$



RF模块/频段双工器

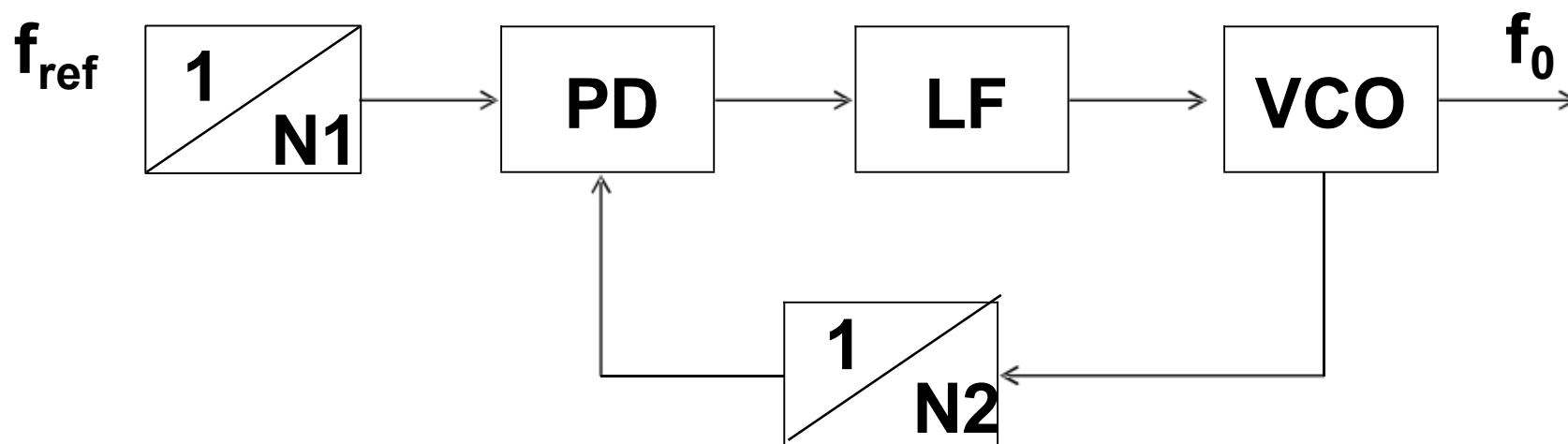


- 1.将不同频段的信号传输给同一传输线并借助同一副天线发送出去。将同一天线接收来的不同频段的信号分开以便进行检测。
- 2.利用两个不同中心频率的带通滤波器进行频率的混合和分离。

项 目	指 标
工作频段 (MHz)	890~915
	935~960
插入损耗(dB)	上行: ≤ 1.5 (902.5MHz)
	下行: ≤ 1.5 (947.5MHz)
带内波动 (dB)	< 0.5
回波损耗 (dB)	> 20
带外抑制 (dB)	> 80
接头类型	SMA
阻抗	50 Ω
承受功率	50W



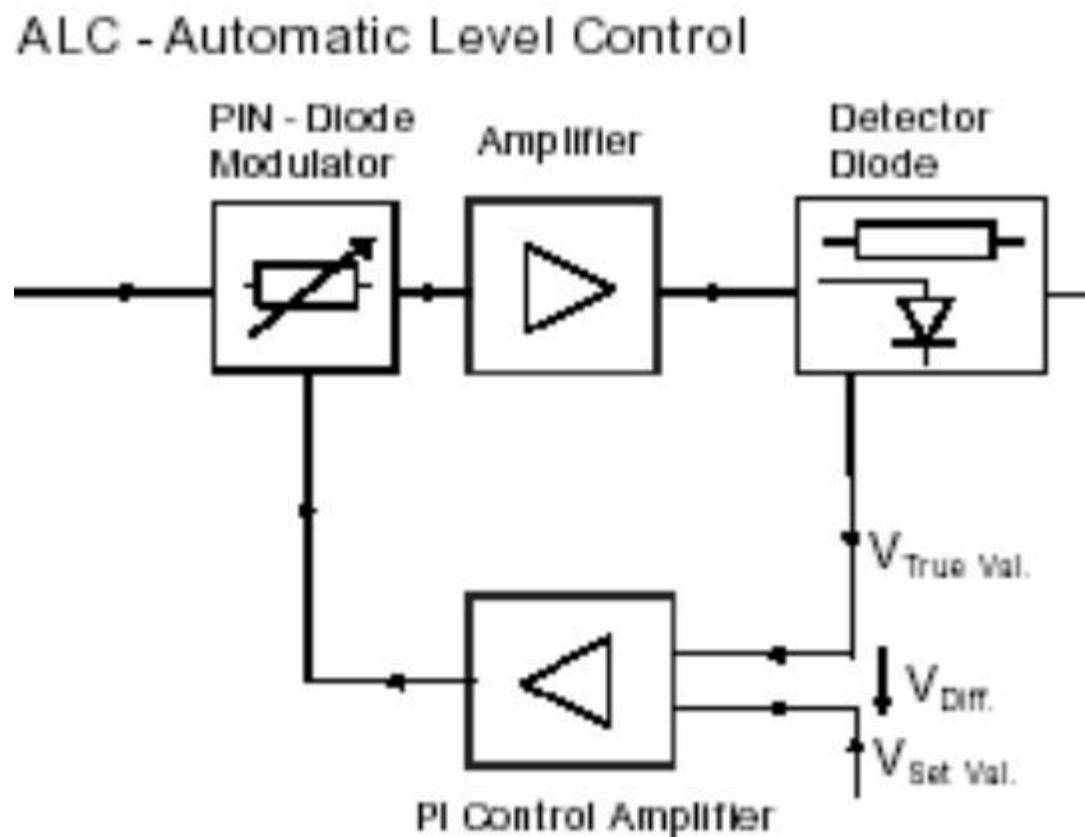
PLL: phase lock loop 锁相环



$$f_0/N_2 = f_{\text{ref}}/N_1$$

$$f_0 = f_{\text{ref}} * N_2 / N_1$$

ALC:自动电平控制



傅立叶变换/反变换



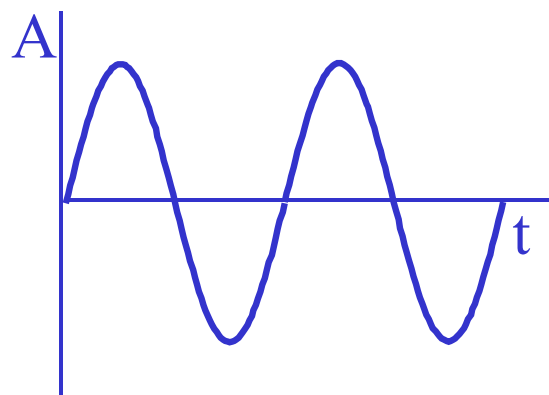
$$F(f) = \int_{-W}^W x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad \text{频域中的信号}$$

$$x(t) = \int_{-W}^W F(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \quad \text{时域信号}$$

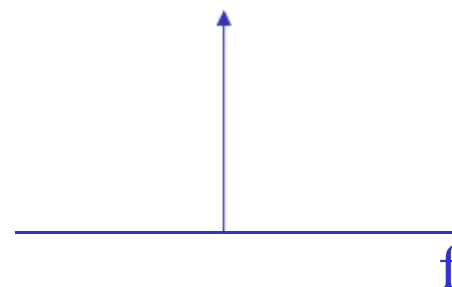
射频信号的数学表示式

$$V = A(t) \cos[2\pi f(t) + \phi(t)]$$

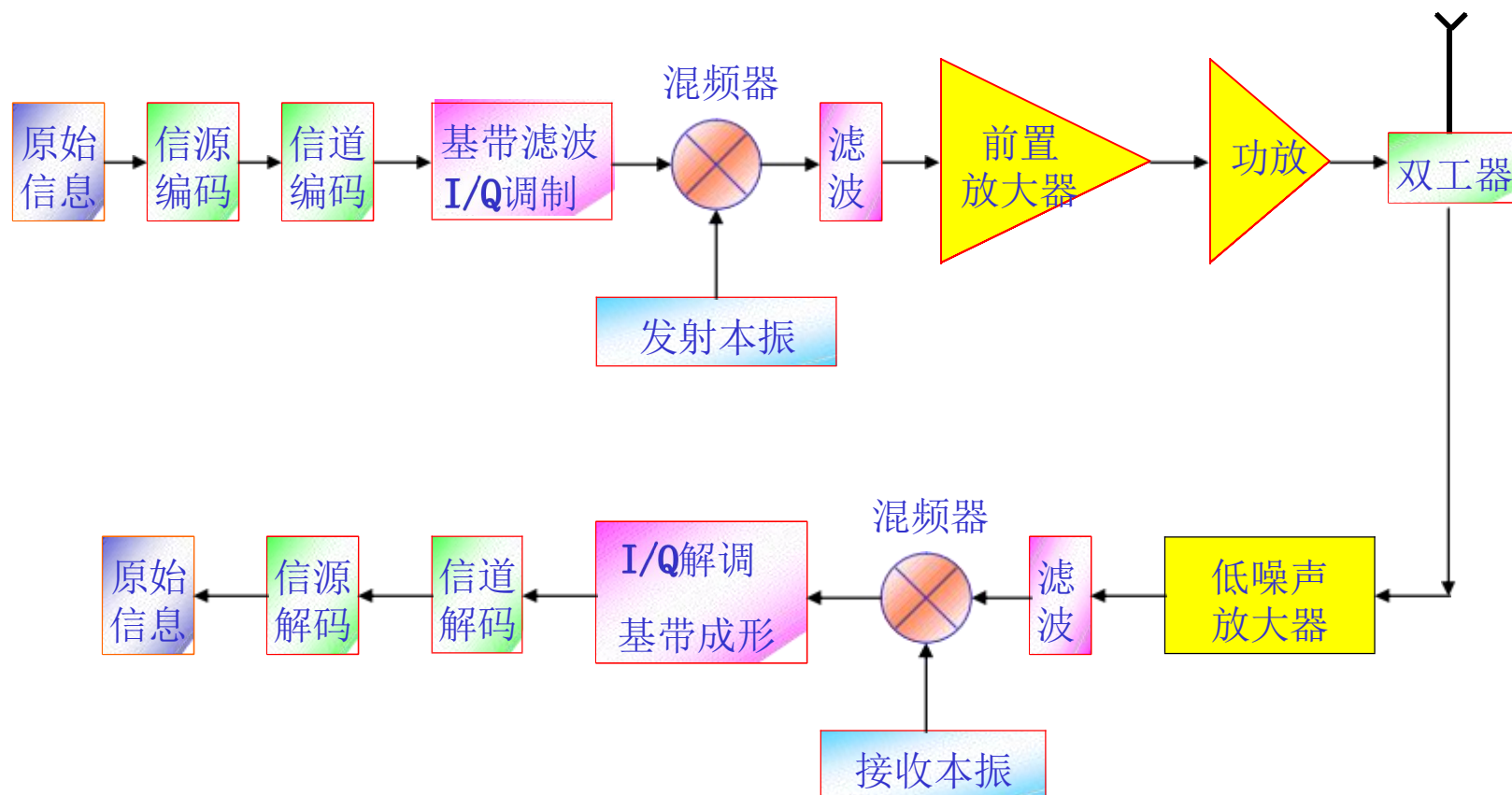
时域



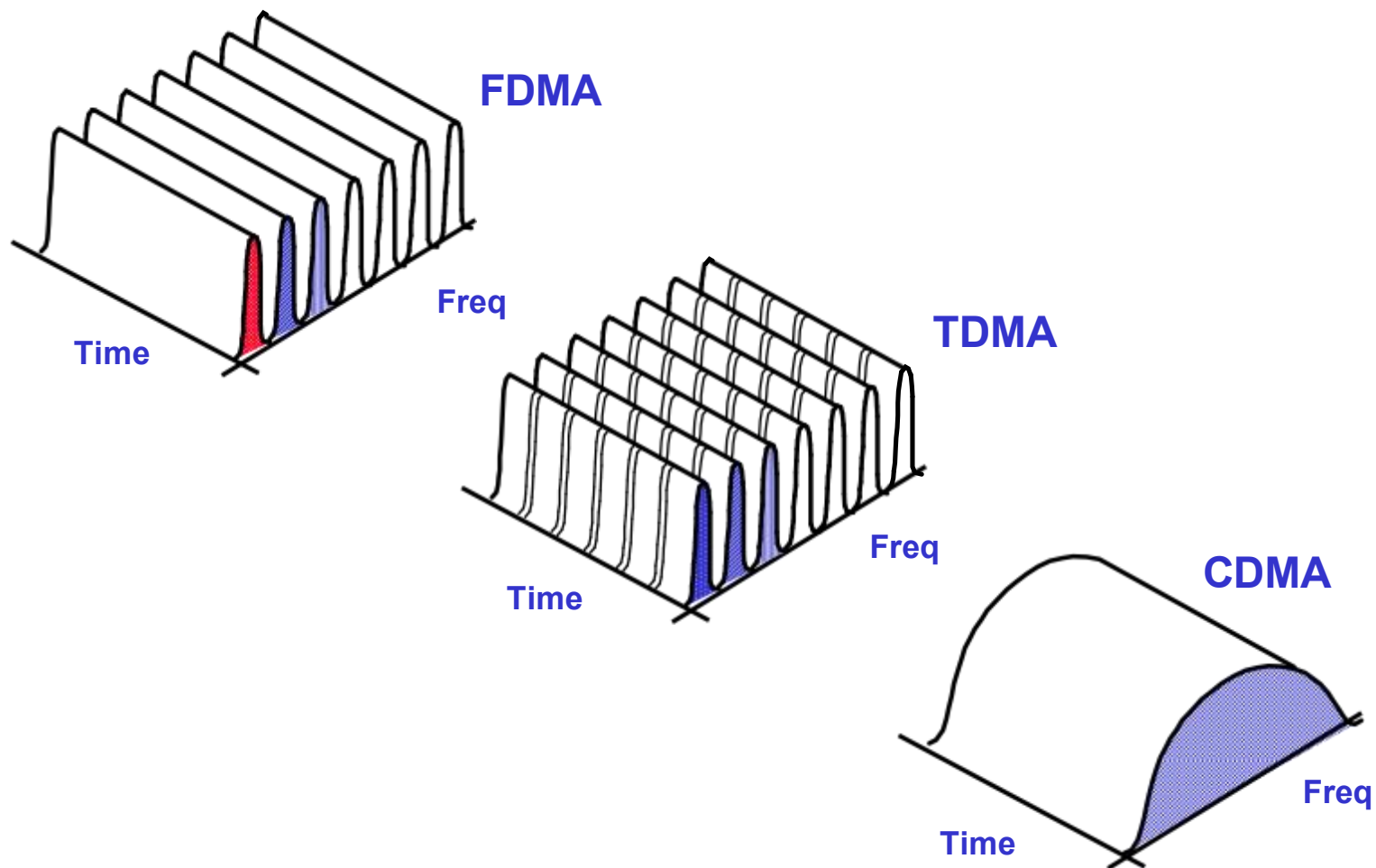
频域



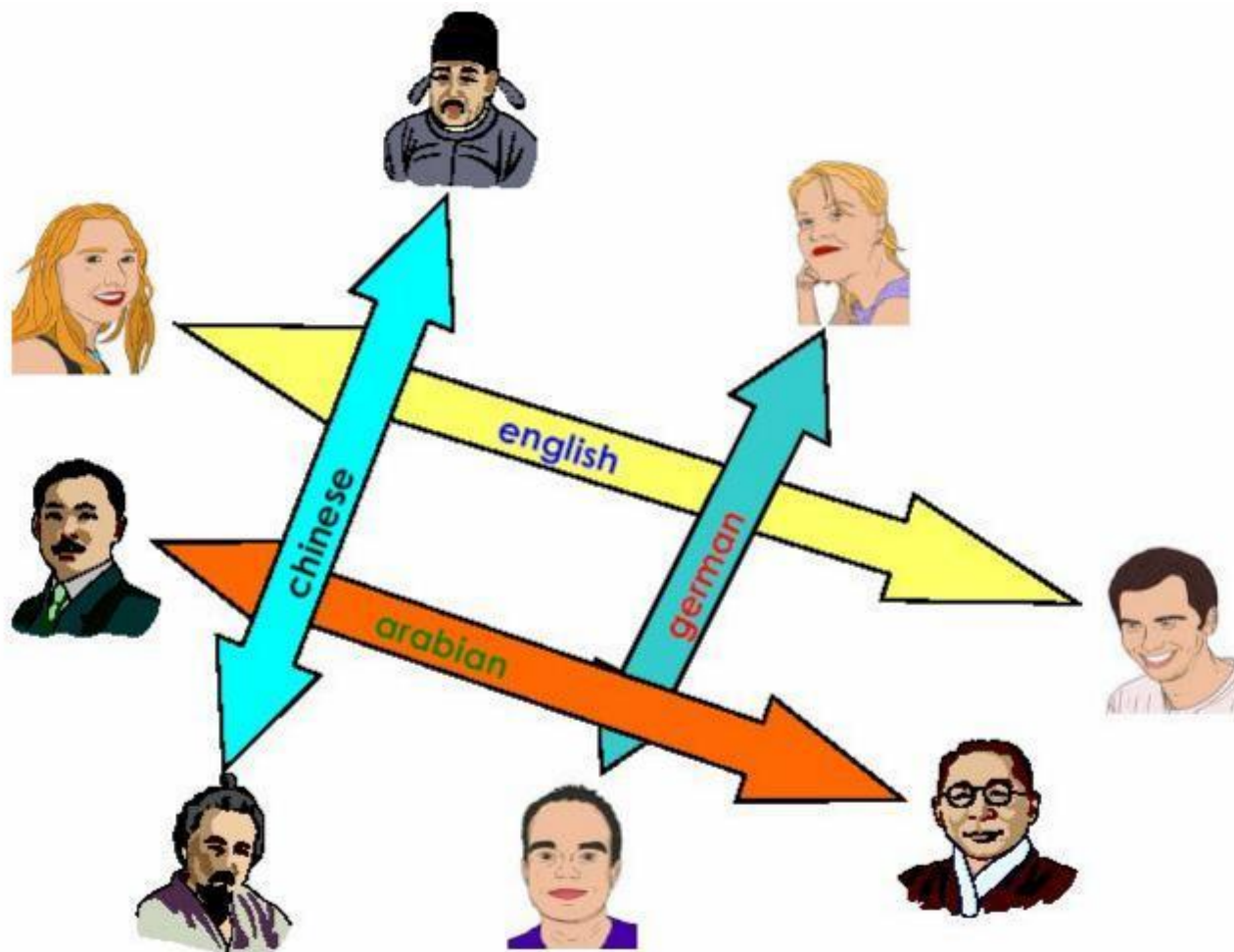
2、数字RF系统的构成



分址方式

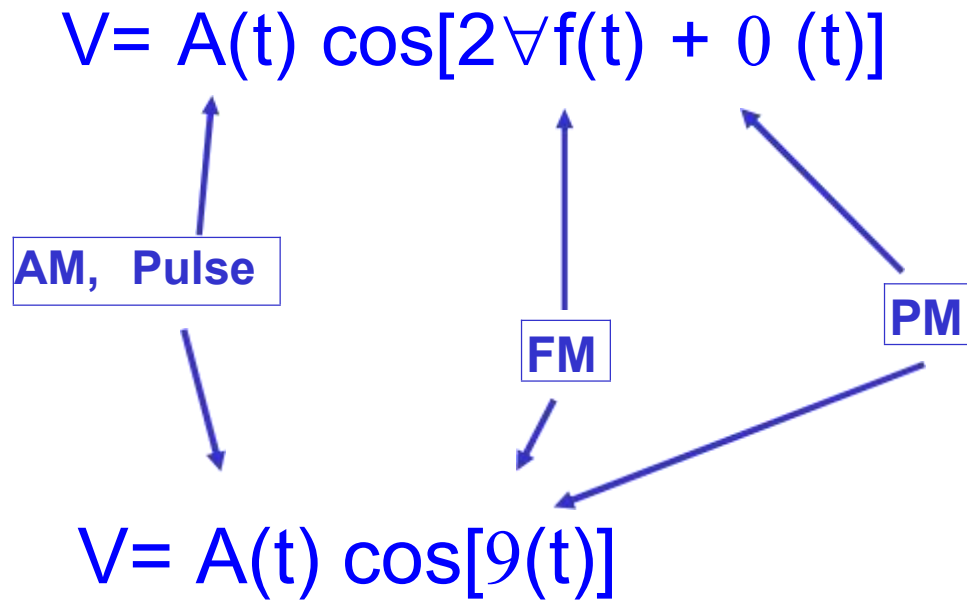


CDMA



3、调制与解调

- 模拟调制 (AM, FM, PM, Pulse)
- 数字调制 (ASK,FSK,PSK,QAM,OFDM)

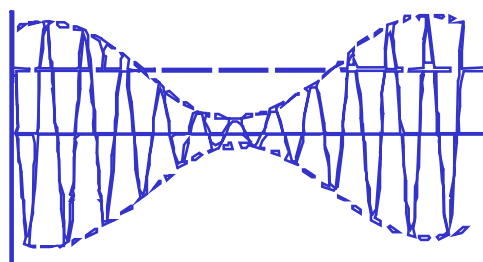


调幅AM

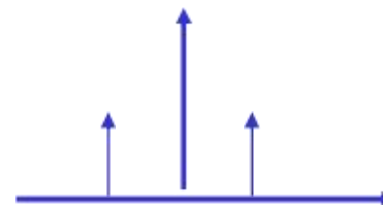
$$U_{\text{Mod}}(t) = U_{\text{C}}(t) \cdot \cos(\omega_{\text{C}}(t) \cdot t + \Phi_{\text{C}}(t))$$

AM

时域



频域



特点：实现简单，抗噪声能力弱。

应用：广播

调频FM与调相PhM

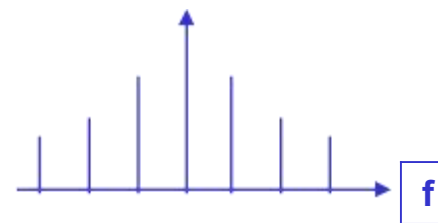
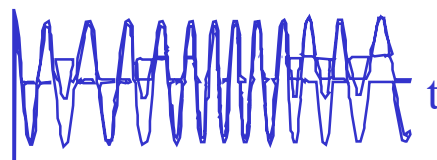
$$U_{\text{Mod}}(t) = U_C(t) \cdot \cos(\omega_C(t) \cdot t + \Phi_C(t))$$

FM

ΦM

时域

频域



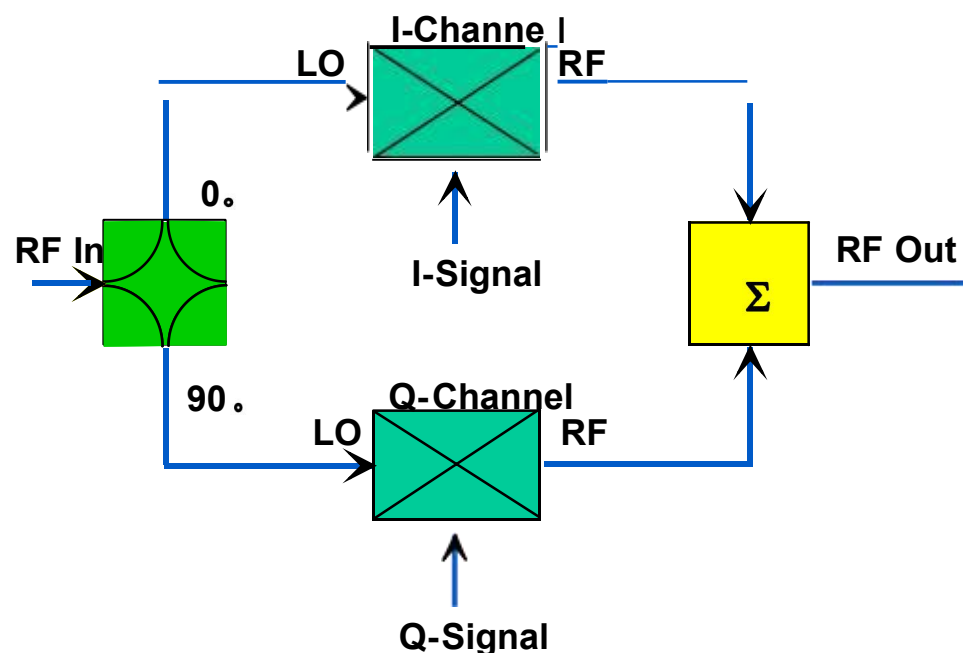
特点：恒定幅度，抗噪声能力强。

应用：广播，对讲机，无线麦克风

数字调制/IQ调制解调器



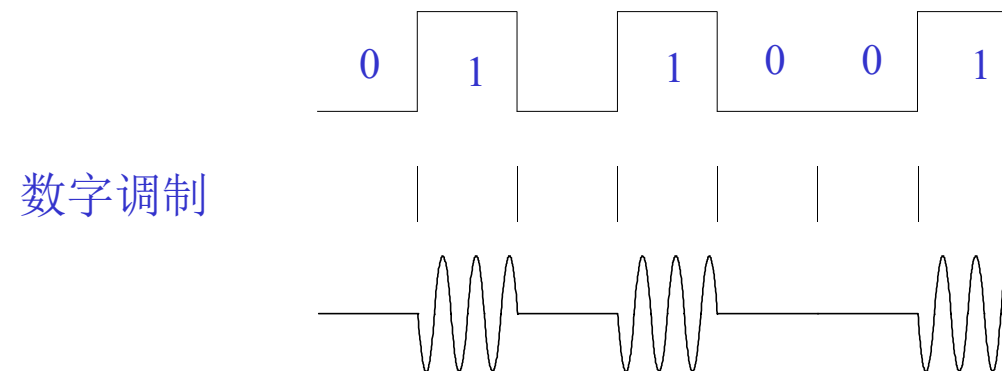
1. IQ信号对上下边带同时产生影响
2. 射频带宽是基带信号带宽的两倍
3. 因为直流输入会导致载波泄漏,所以不允许直流偏置存在
4. IQ两路信号等幅
5. IQ两路信号无相位,偏移和时间延迟
6. IQ解调器过程可逆



ASK 幅移键控

$$U_{\text{MOD}}(t) = \hat{U}_C(t) \cdot \cos [\omega_C \cdot t + \varphi_C(t)]$$

↑
AM



特点：实现简单，占用带宽大。

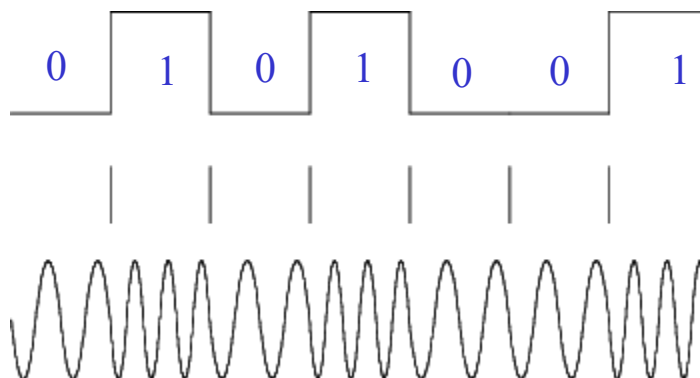
应用：汽车遥控器

FSK 频移键控

$$U_{\text{MOD}}(t) = \hat{U}_C(t) \cdot \cos [\omega_C \cdot t + \varphi_C(t)]$$

↑
FM

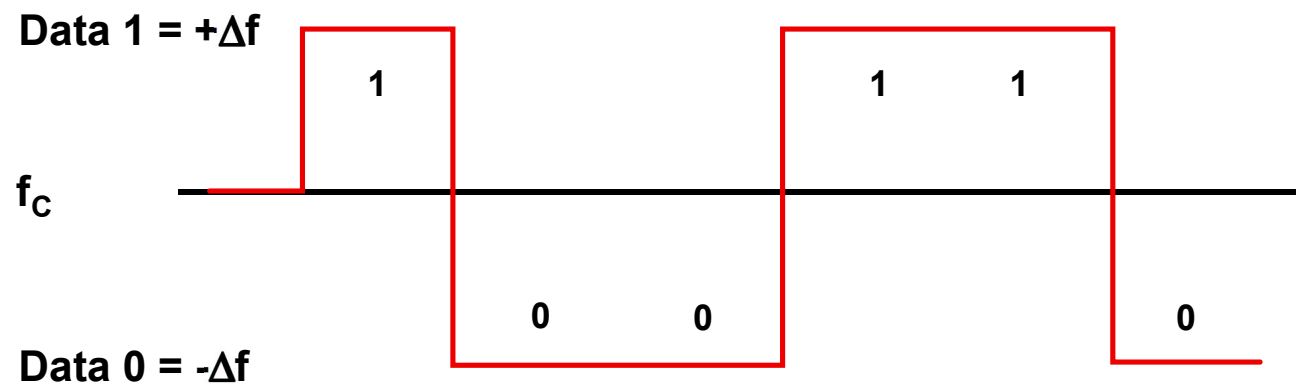
数字调制



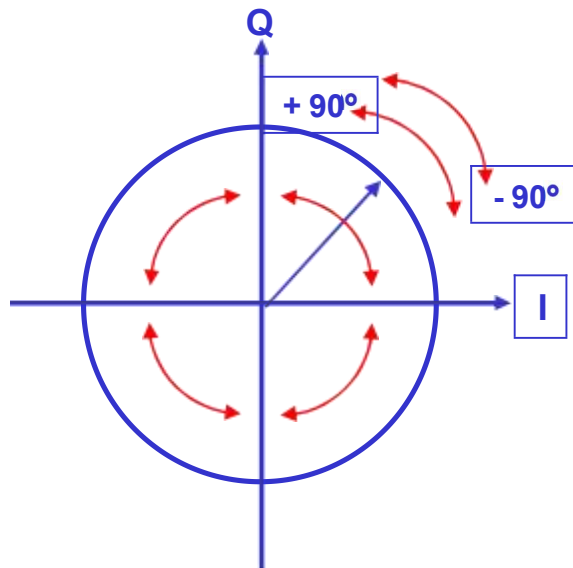
特点：抗噪声能力强

应用：无绳电话, 寻呼机

MSK 最小频移键控



MSK 最小频移键控



相移 $+90^\circ$ 逻辑 “1”

相移 -90° 逻辑 “0”

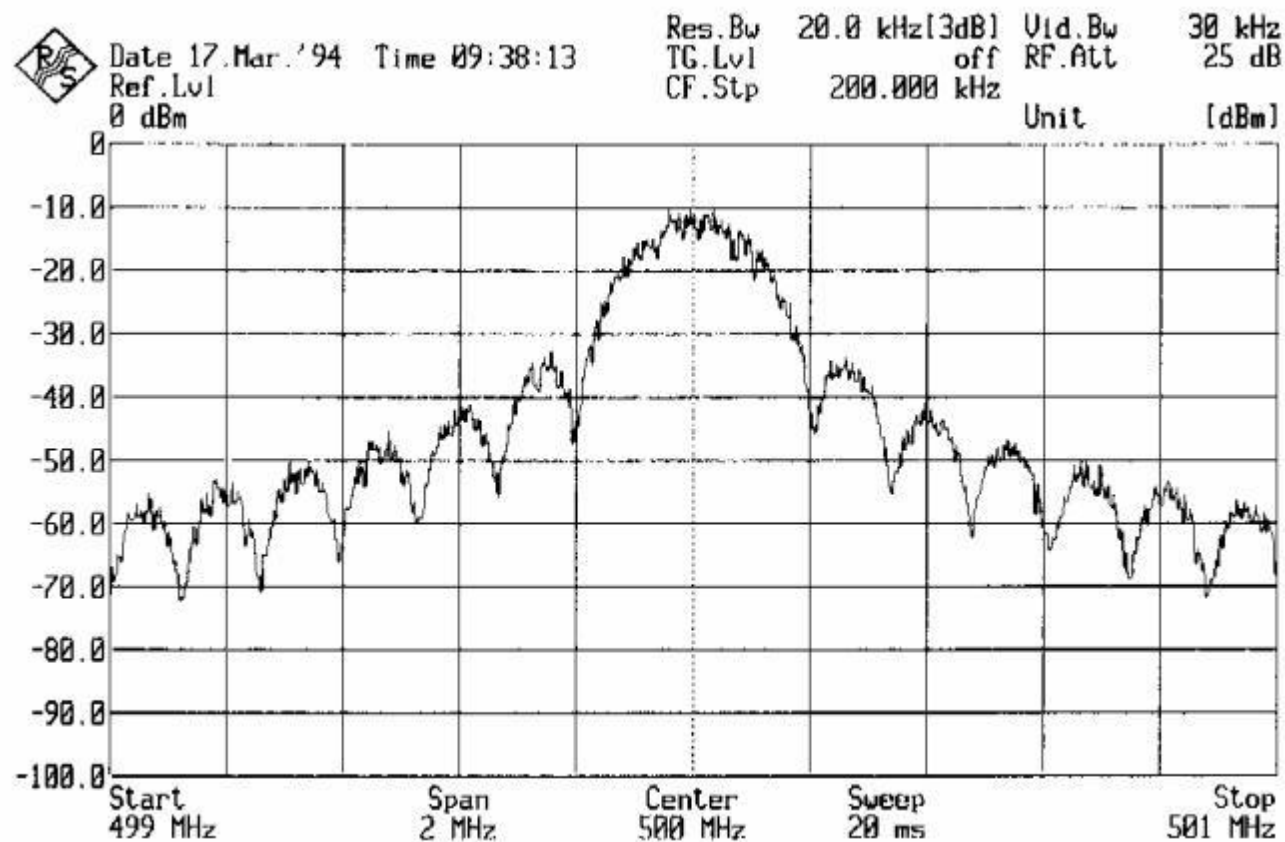
$$\Delta\omega_c = \frac{\Delta\Phi}{T_{\text{Bit}}} = \Delta\Phi * f_{\text{Bit}}$$

$$2\pi \Delta f_c = \frac{2\pi}{4} * f_{\text{Bit}}$$

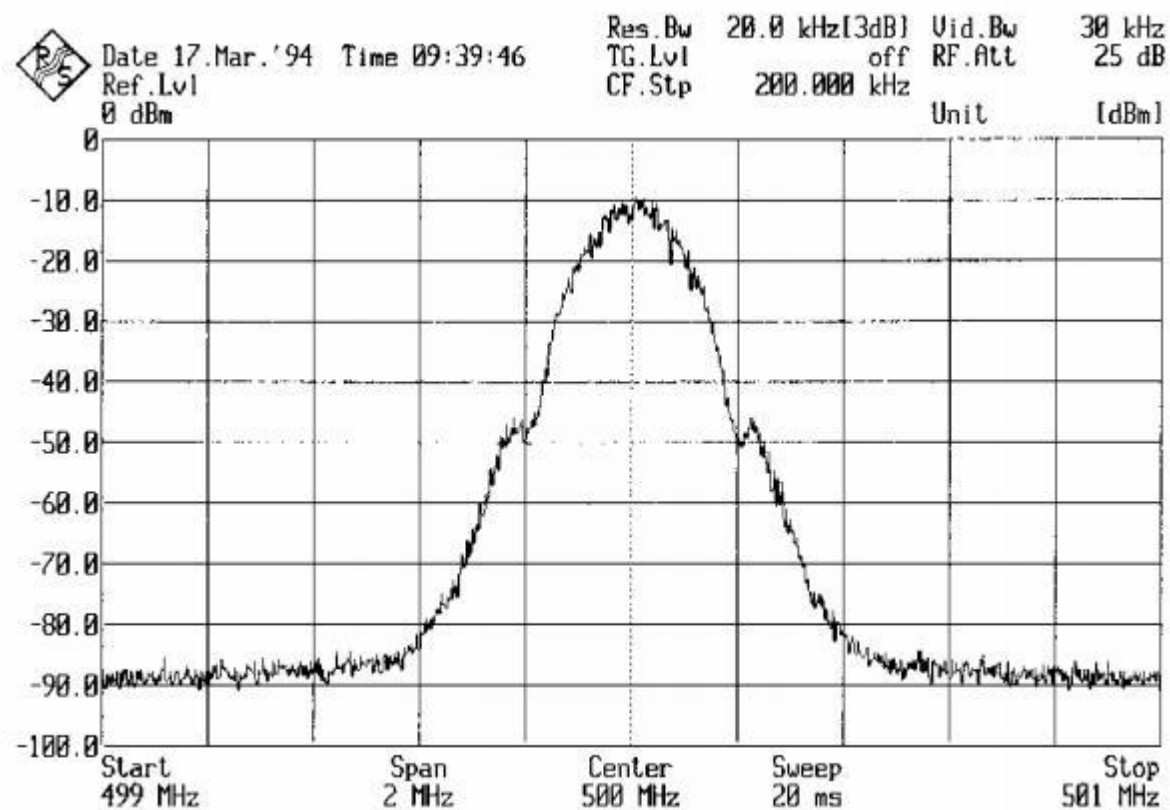
$$\Delta f_c = \frac{1}{4} * f_{\text{Bit}}$$

$$m = \frac{\Delta f_c}{f_m} = \frac{\frac{1}{4} * f_{\text{Bit}}}{\frac{1}{2} * f_{\text{Bit}}} = 0.5$$

MSK的频谱



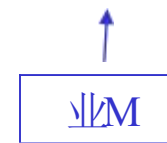
GMSK的频谱



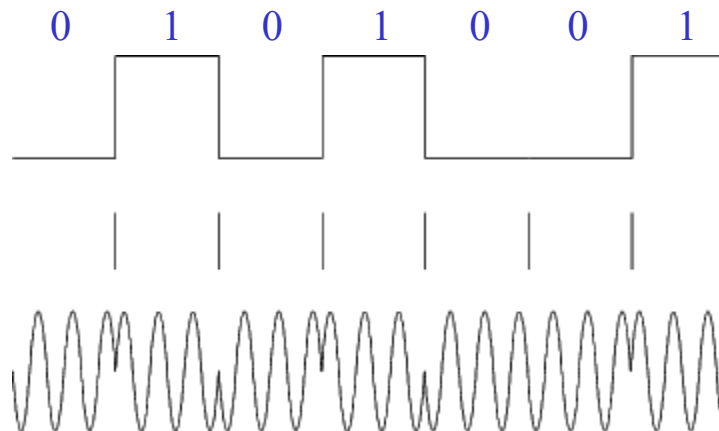
在MSK调制后采用高斯滤波器,存在符号间干扰,占用频带变窄,主要应用于GSM。

PSK 相移键控

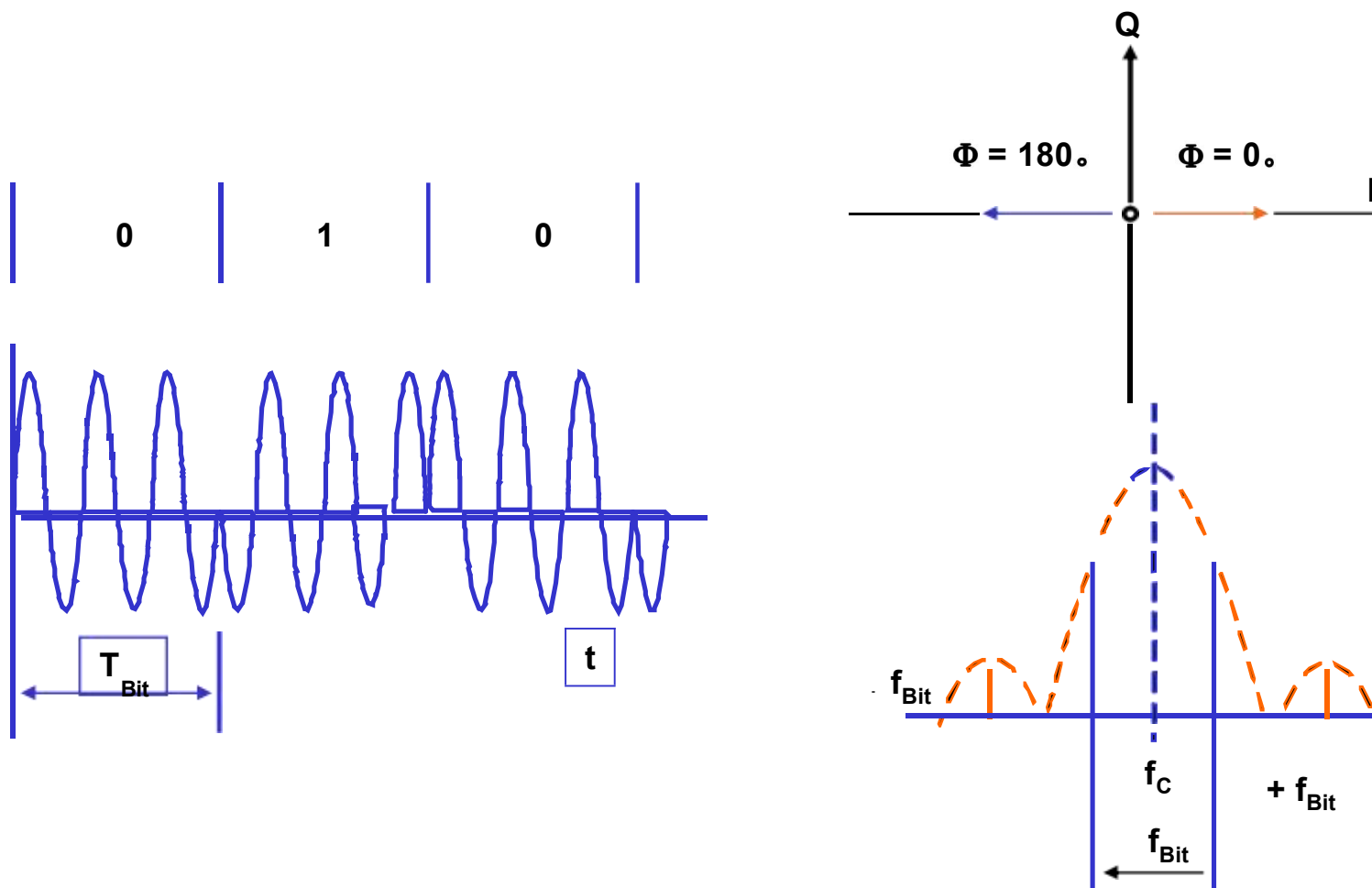
$$U_{\text{MOD}}(t) = \hat{U}_C(t) \cdot \cos [\omega_C \cdot t + \varphi_C(t)]$$



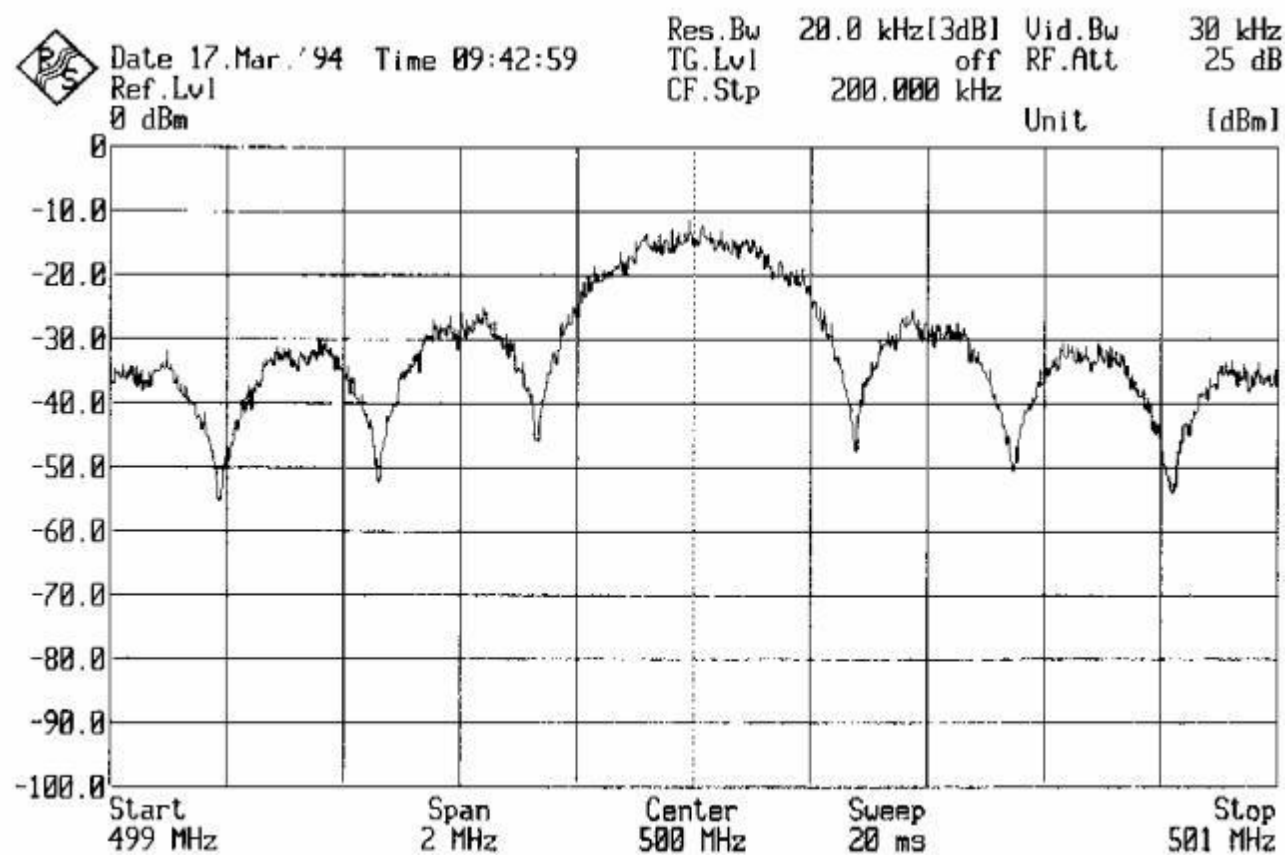
数字调制



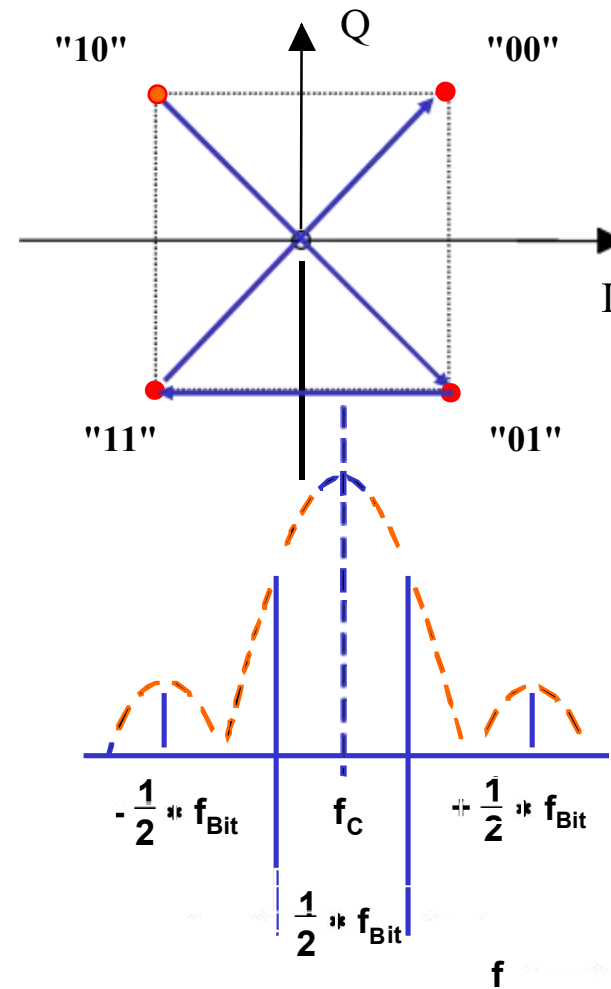
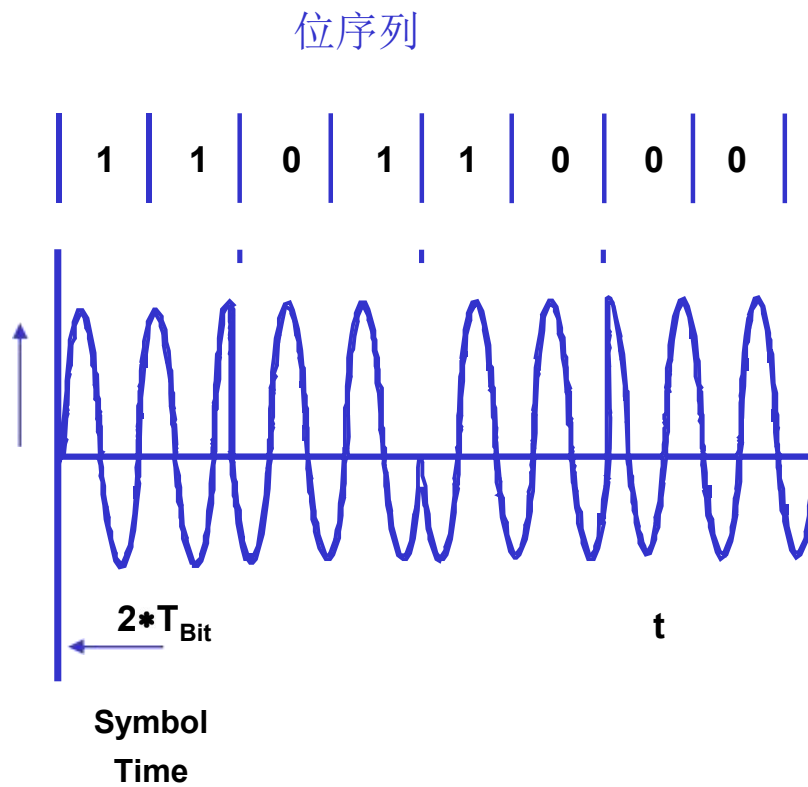
BPSK



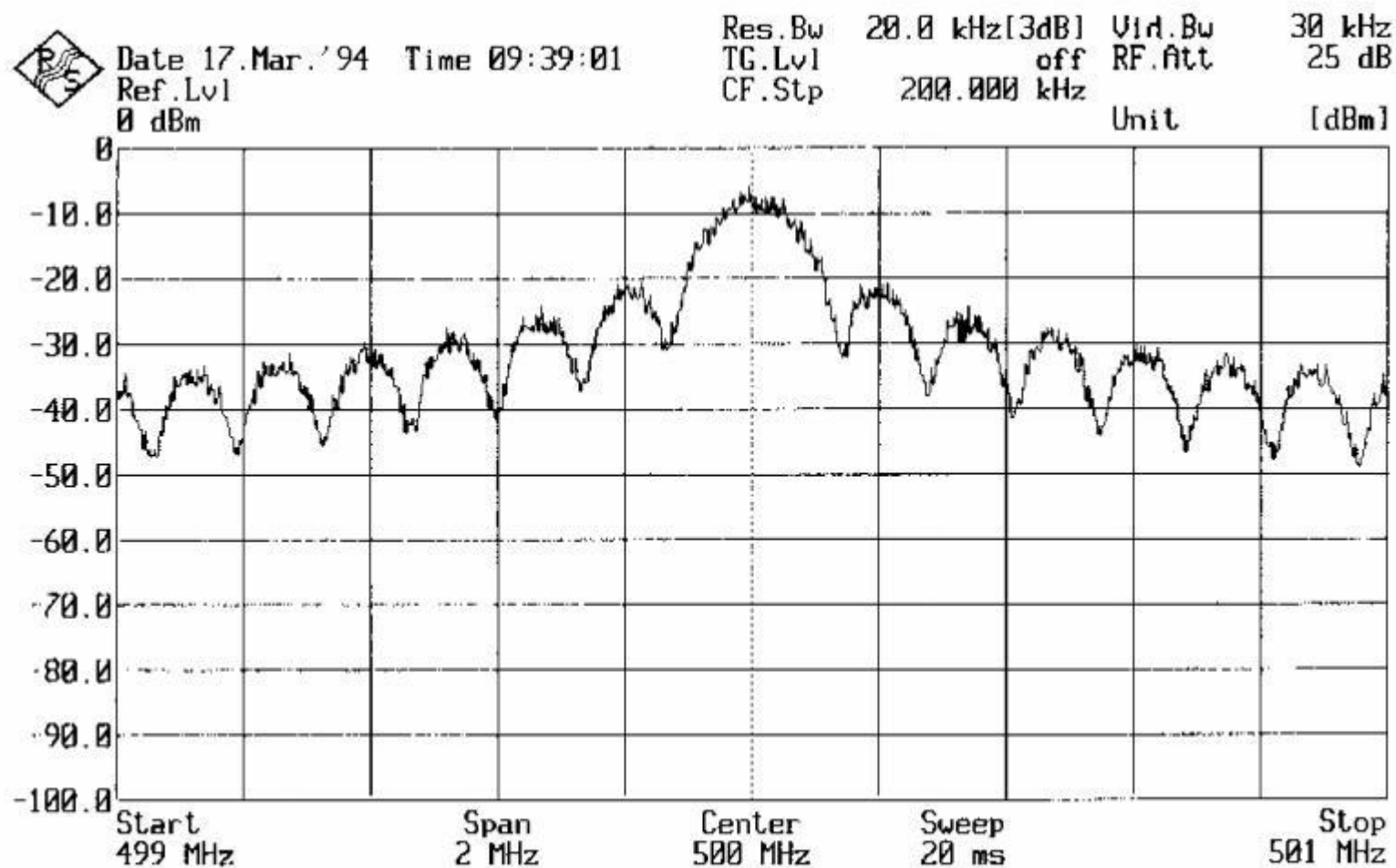
BPSK的频谱



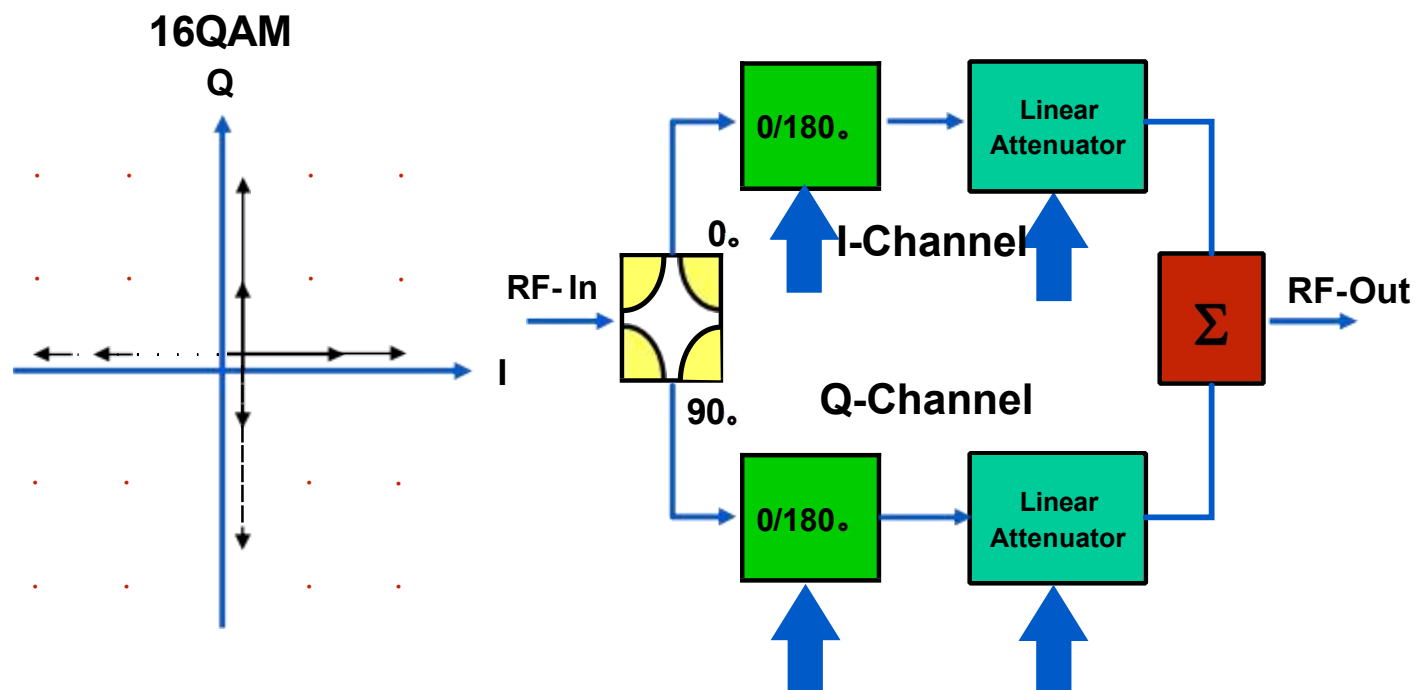
QPSK



QPSK的频谱



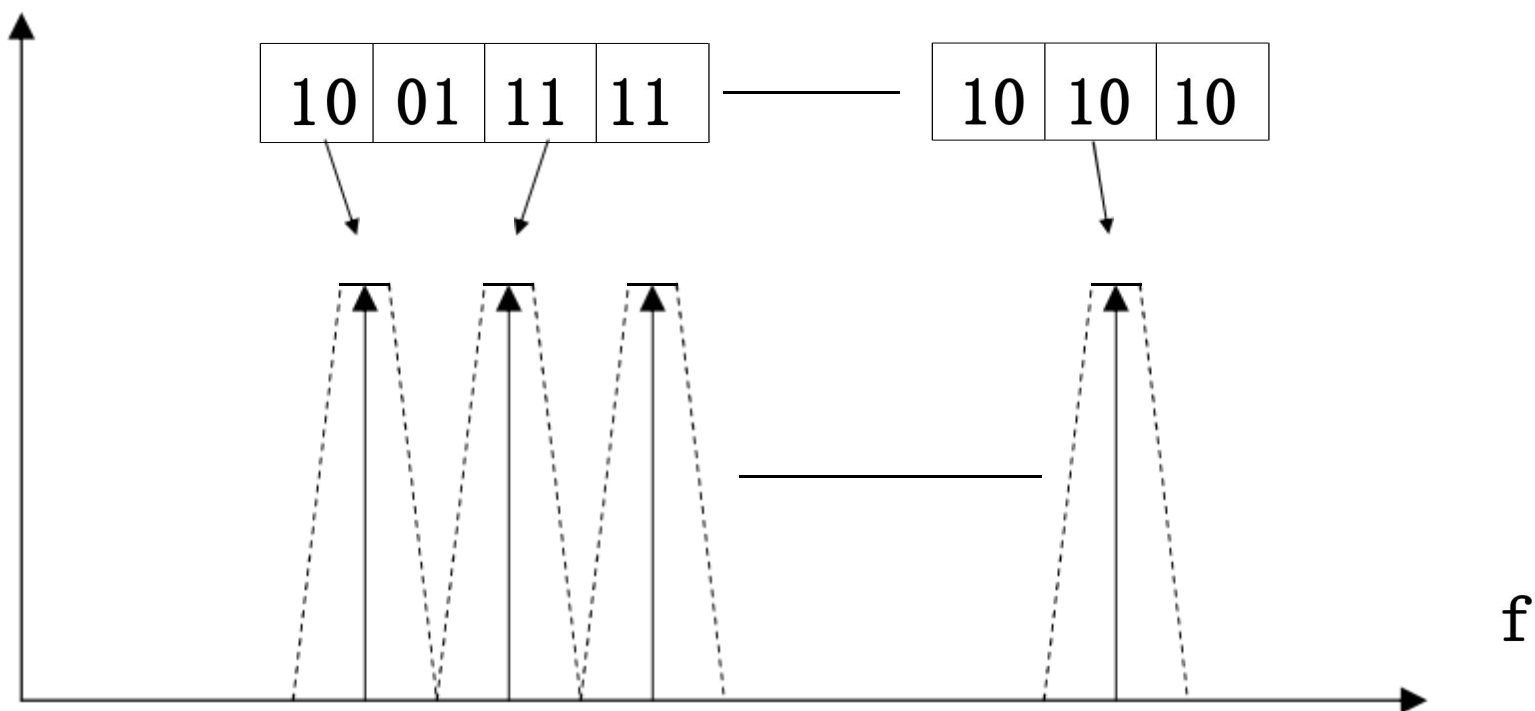
正交幅度调制QAM



正交频分复用OFDM

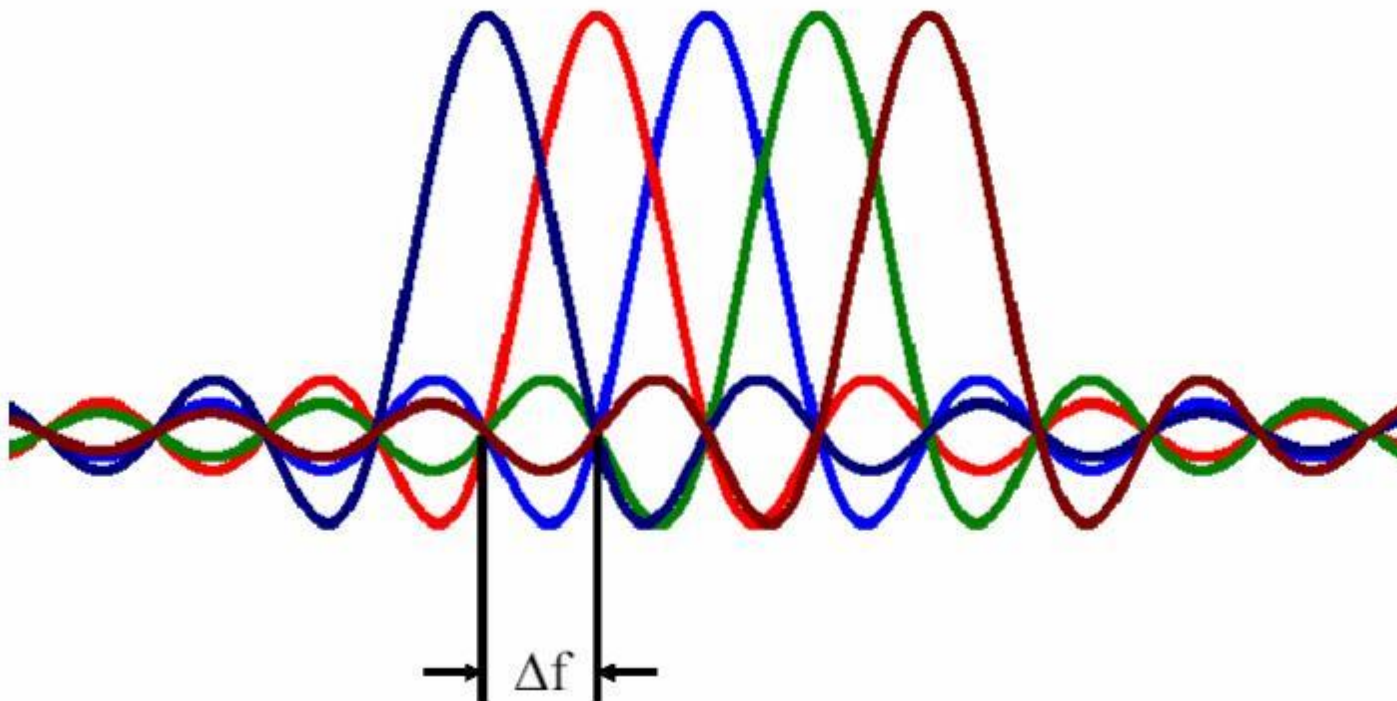


OFDM: orthogonal frequency division multiplexing

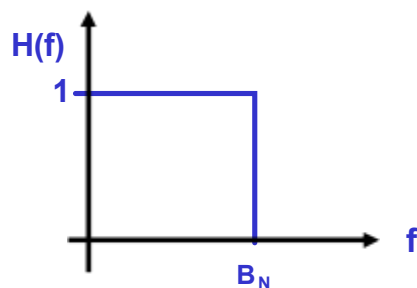


应用: WLAN 802.11a/g, Wimax, 数字电视地面广播DVB-T

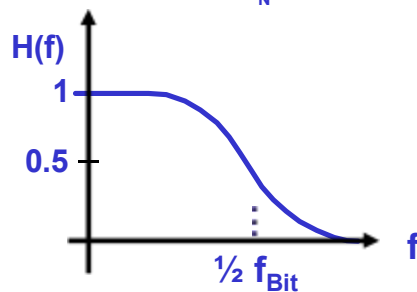
OFDM



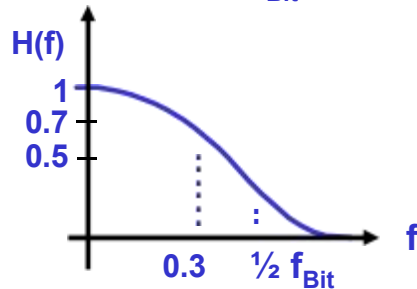
基带滤波器类型



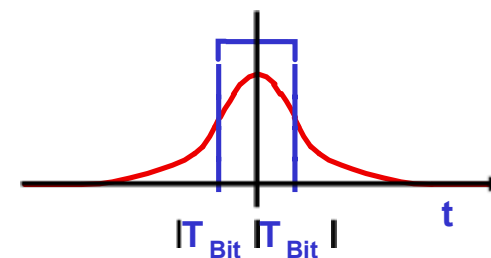
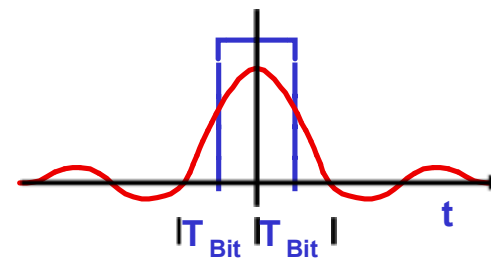
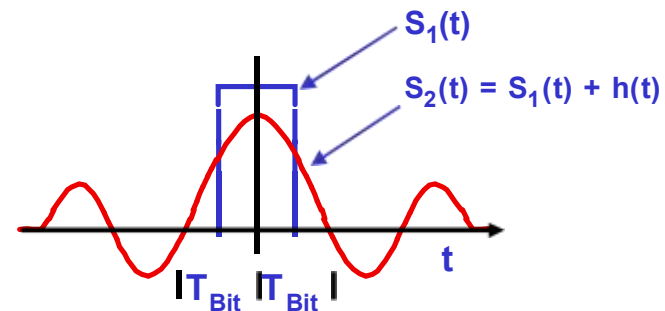
$h(t) \longleftrightarrow H(f)$
Ideal Lowpass
 $B_N = \frac{1}{2} f_{\text{Bit}}$



$\cos^2$ Roll off
 $r = 0.5$



Gaussian
 $B * T_{\text{Bit}} = 0.3$
 B 3dB bandwidth
 $T_{\text{Bit}} = \frac{1}{f_{\text{Bit}}}$



4.RF的测量



1.时域分析

6. ACLR

2.频域分析

7.调制特性

3.频率

8.网络分析(S参数)

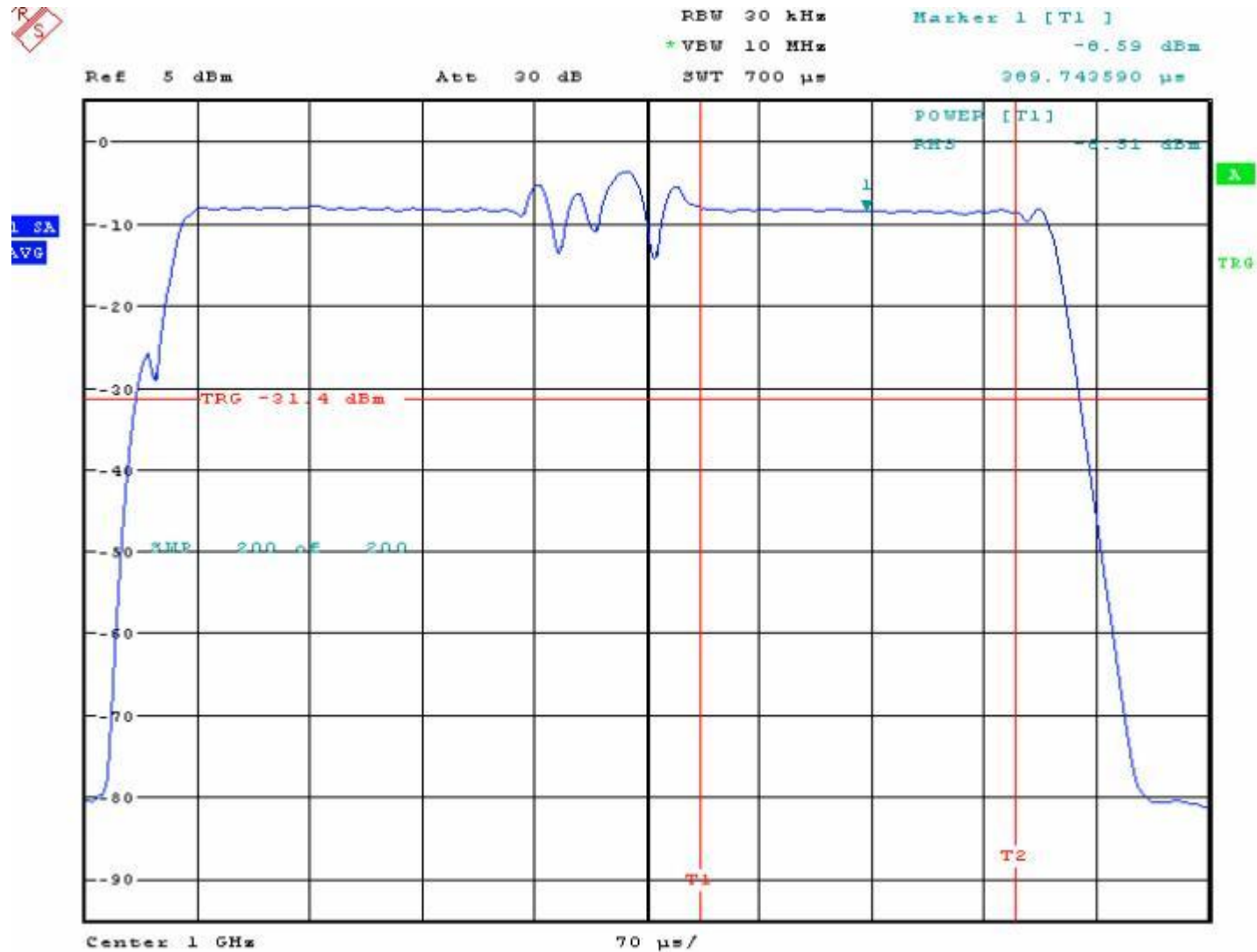
4.功率/电平

9.非线性分析,TOI,P-1,杂散

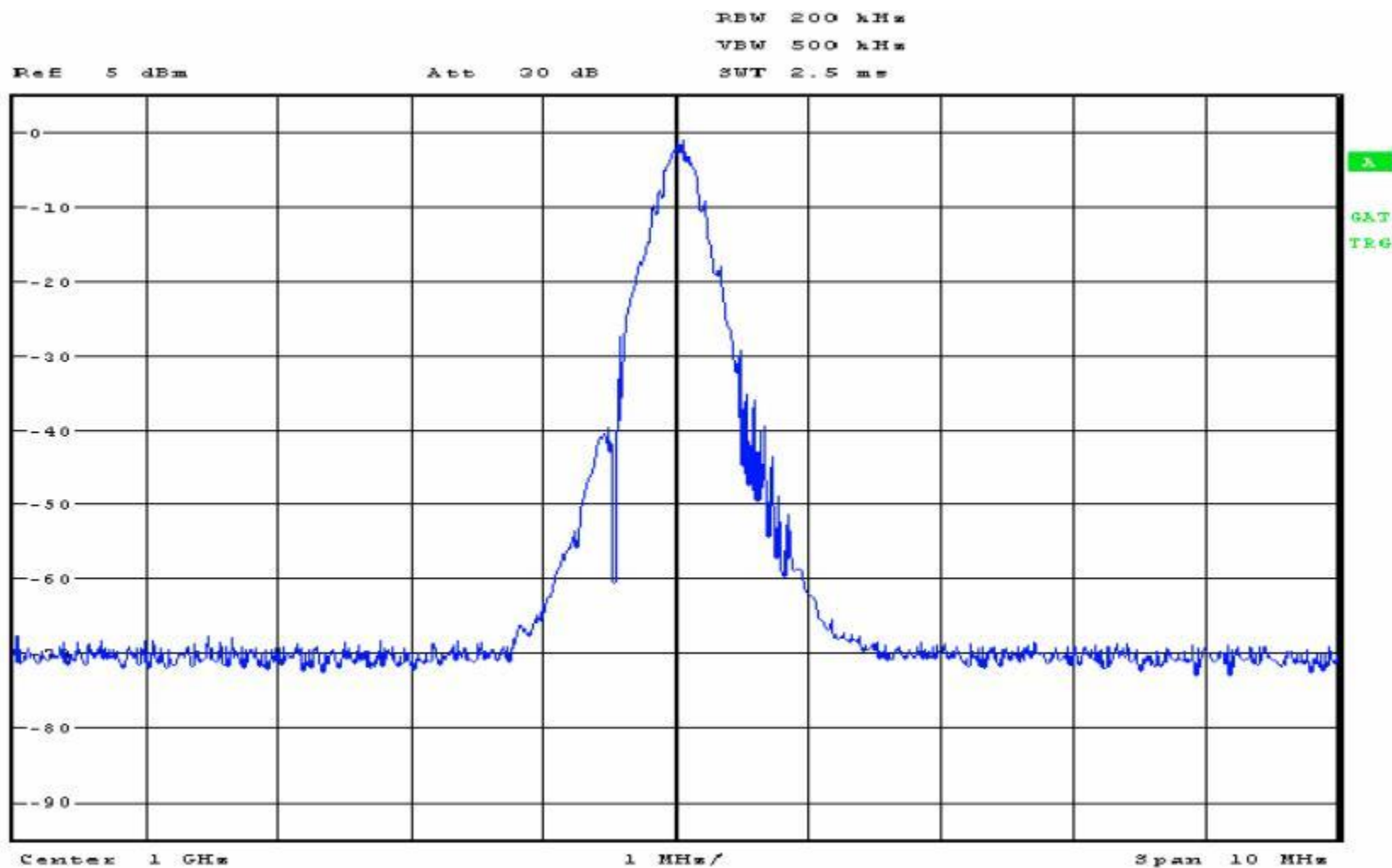
5.相位噪声

10.噪声系数

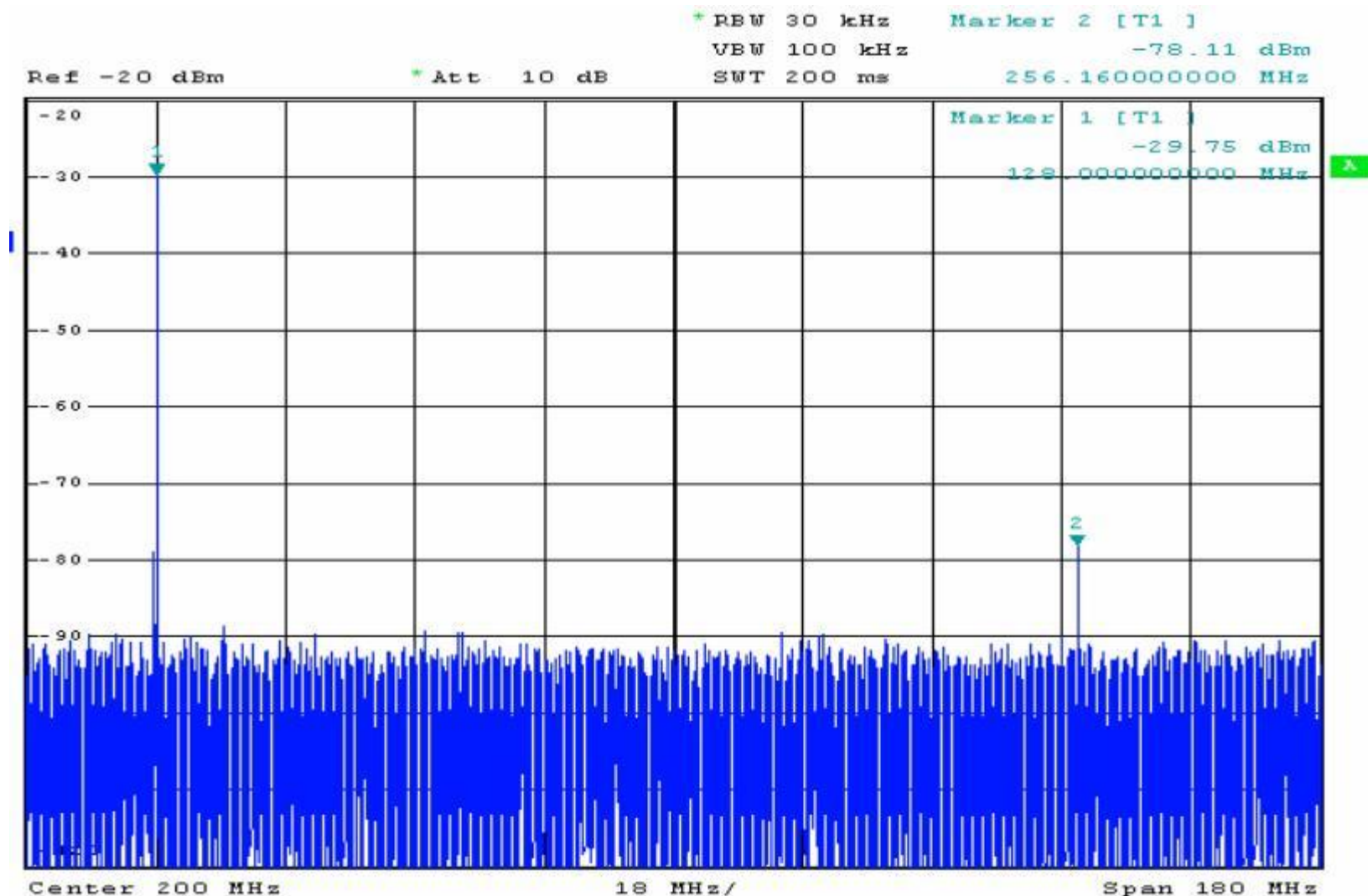
时域分析



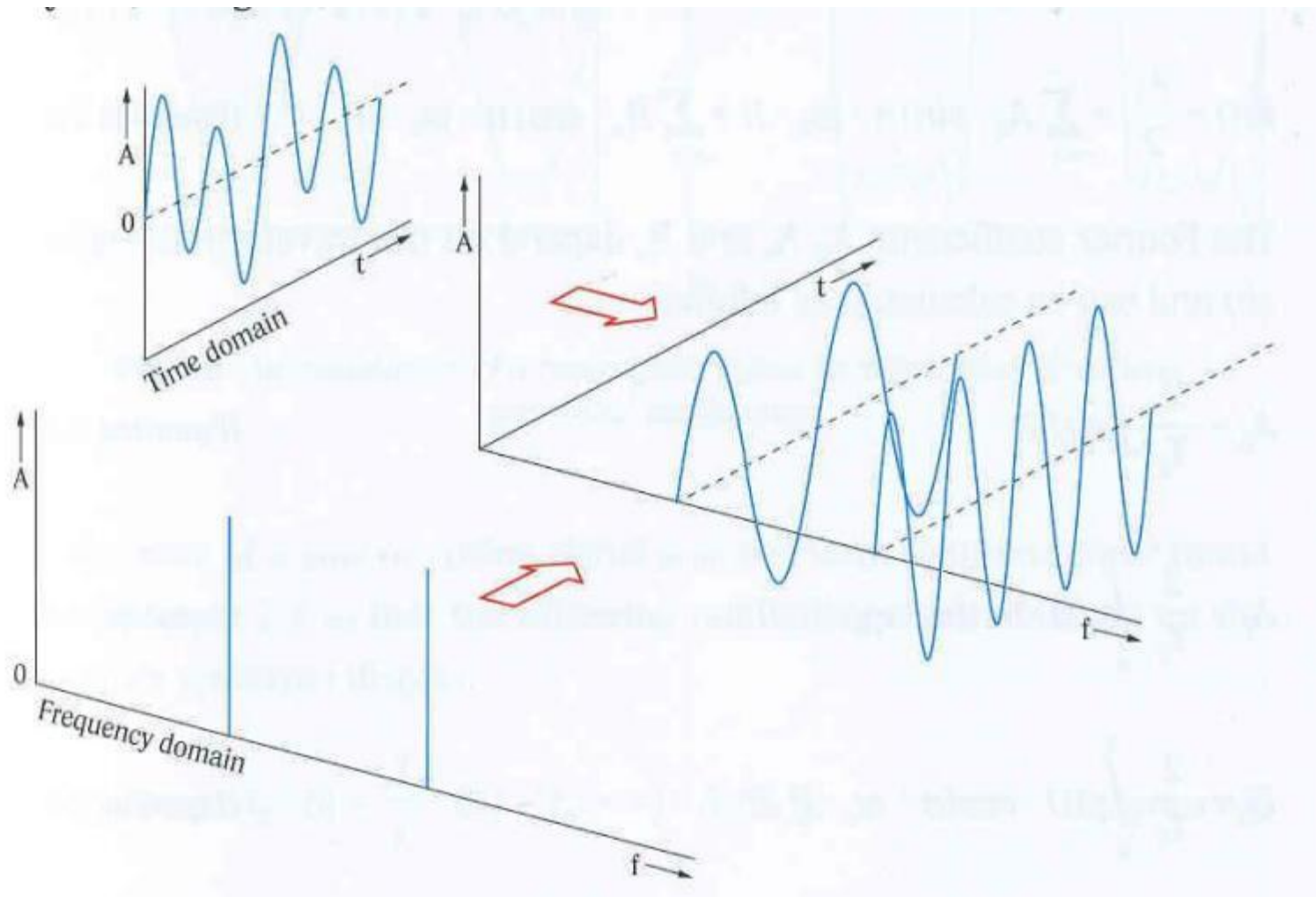
GSM信号的频域分析



单载波信号的频谱



为什么进行频谱分析?



频率测量



测试方法:

1. 频率计
2. 频谱仪
3. 频谱仪/计数器

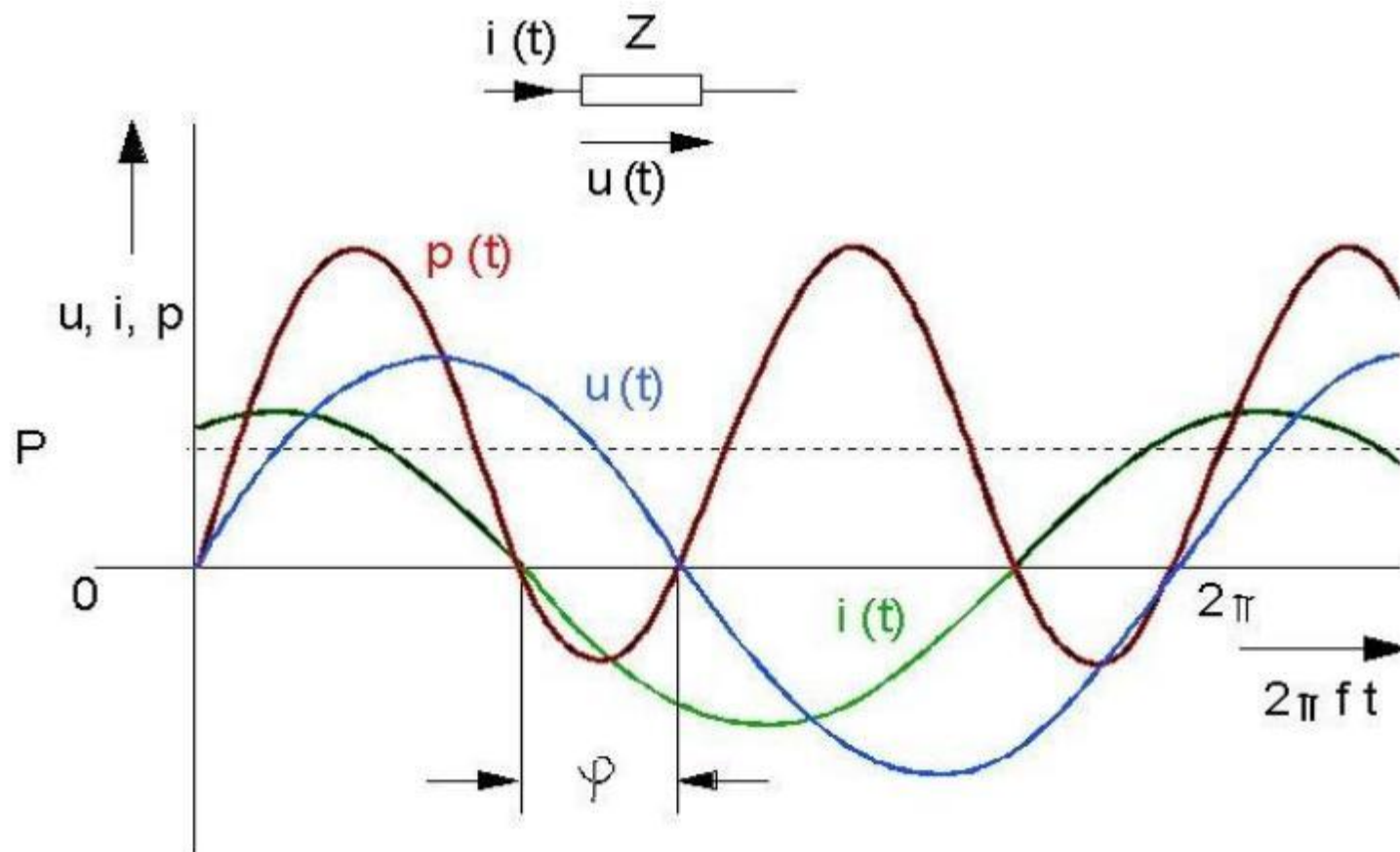
r 功率计

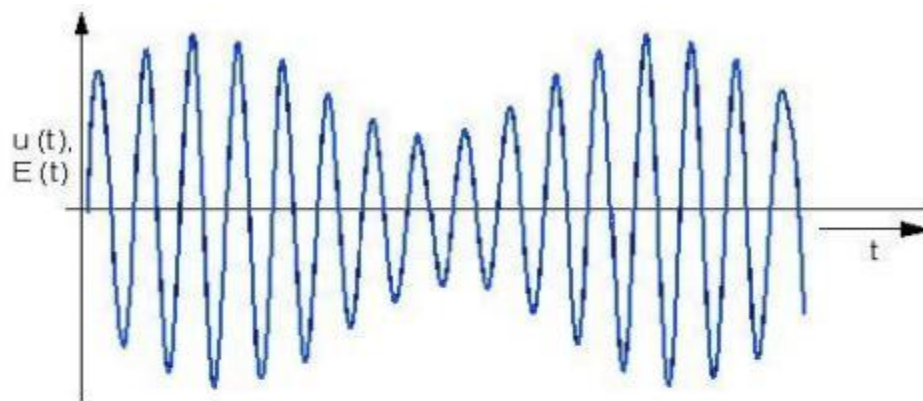
- 精确
- 宽带,无选择性
- 有限的动态范围 (约 90 dB)

r 频谱分析仪

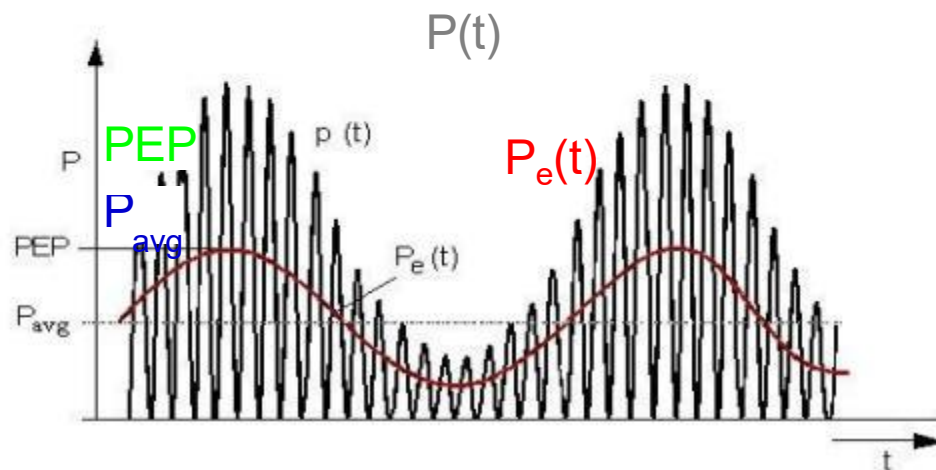
- 选择性
 - 有利于信道功率的测量
 - 有利于相邻信道功率的测量
- 高的动态范围(160 dB测量范围)

RF功率的测量



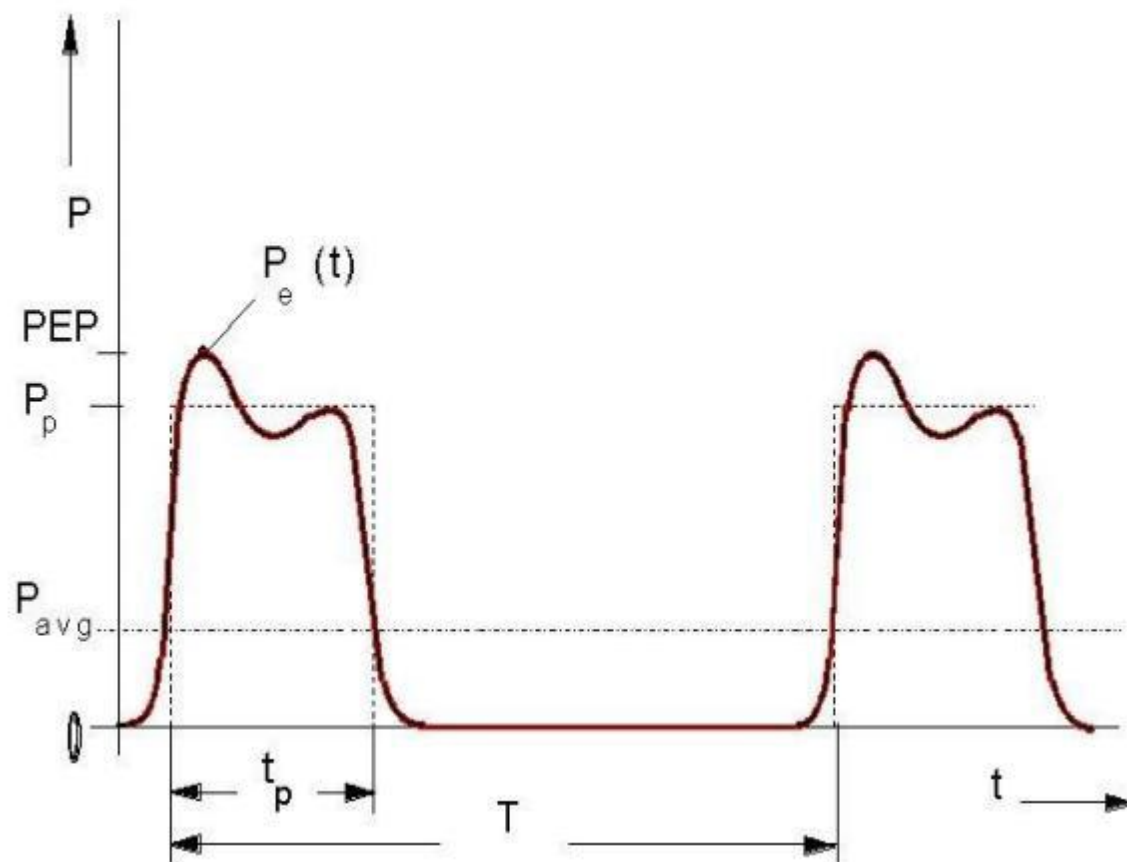


已调制信号包络



$P(t)$	瞬时功率
$P_e(t)$	包络功率
PEP	包络峰值功率
P_{avg}	平均功率

脉冲功率

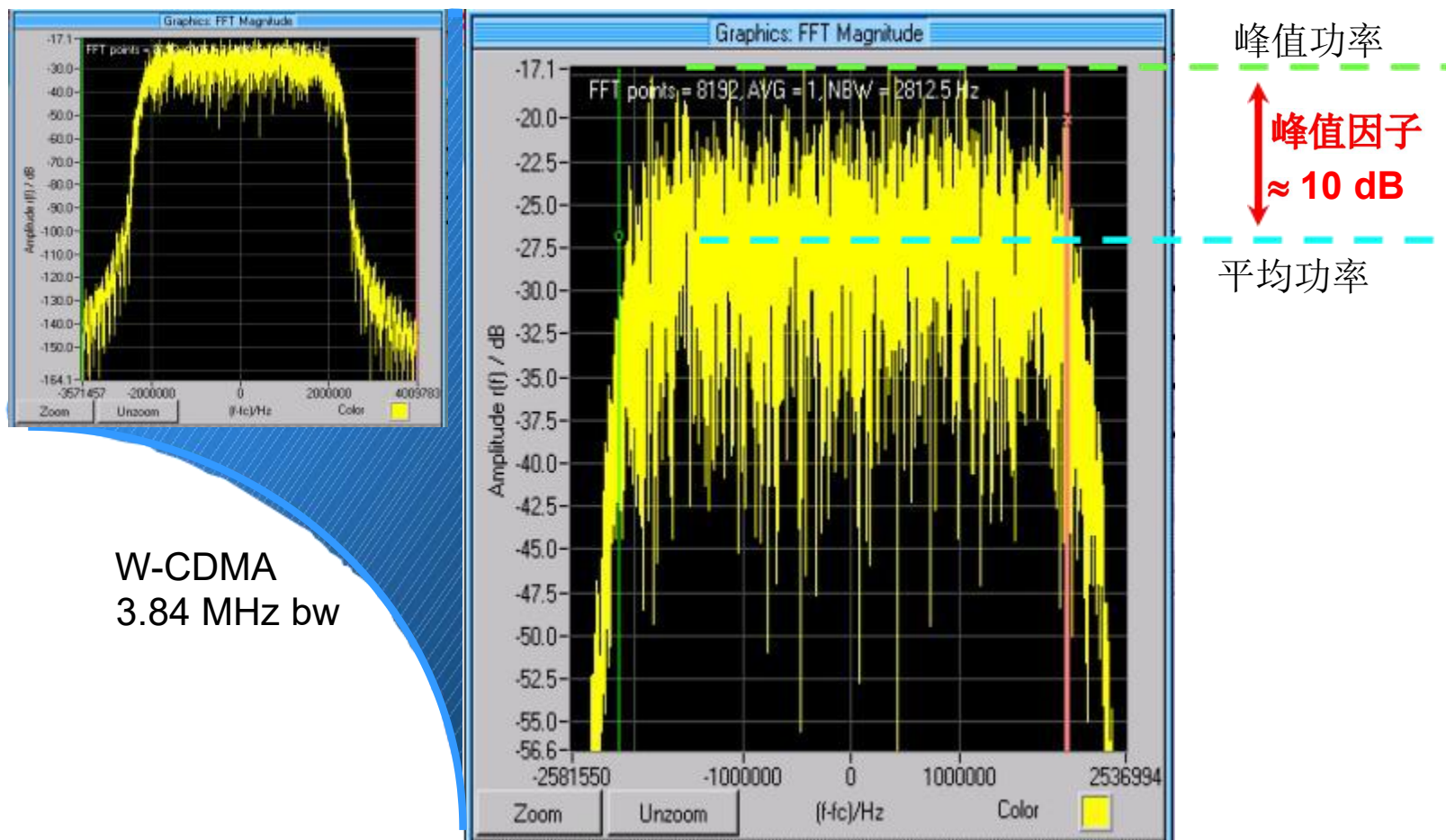


脉冲功率 P_p

$$P_p = \frac{P_{avg}}{(t_p / T)}$$

峰值因子 (crest factor)

峰值因子，又称为峰均比，是峰值功率和平均功率之差。



信道功率的测量方法

积分带宽法



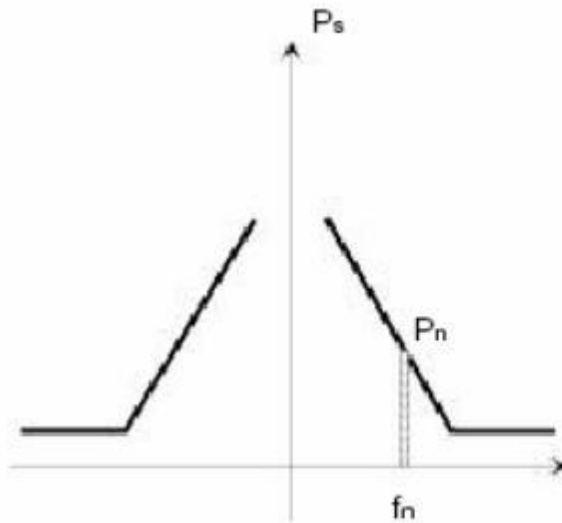
$$CP = 10 \cdot \log \left[\frac{CHBW}{RBW \cdot k_n} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{\frac{P_i - a_{i(RRC)}}{10}} \right]$$

CP = 信道功率	dBm
CHBW = 信道带宽	kHz
RBW = 测量用的分辨带宽	kHz
kn = 使用RBW 的等效噪声带宽的修正因子	
N = 信道内的像素点数	
Pi = 踪迹的i像素点的电平值	dBm
ai(RRC) = I像素点的3GPP RRC滤波器的衰减值	dB

相位噪声



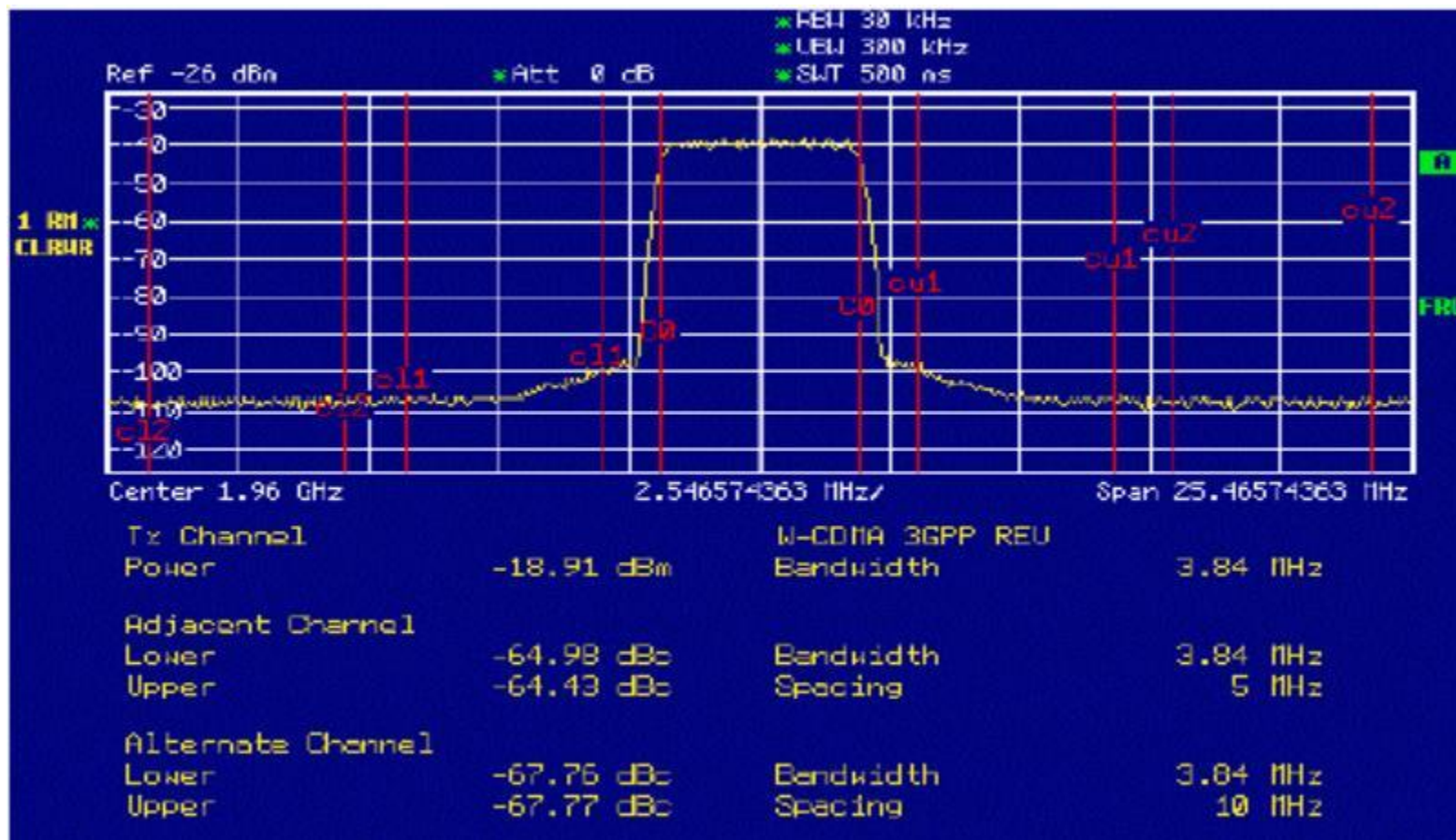
1. 相位噪声, 在偏离载波固定位置处 f_n , 单位带宽1Hz内的噪声功率 P_n 与信号总功率 P_s 的比值。
2. 相位噪声是反映单载波信号的频谱纯度
3. 单位为dBc/Hz@ f_n offset, 如-135dBc/Hz@10kHz



$$L(f) = 10 * \log \frac{P_n}{P_s}$$

邻信道功率泄漏比ACLR ROHDE & SCHWARZ

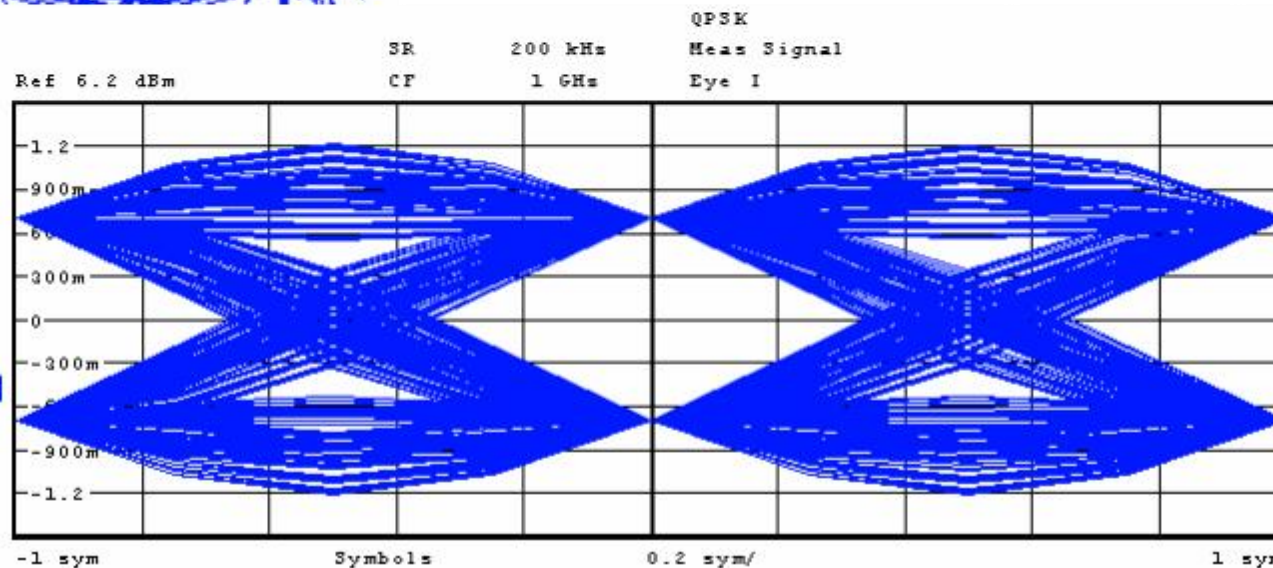
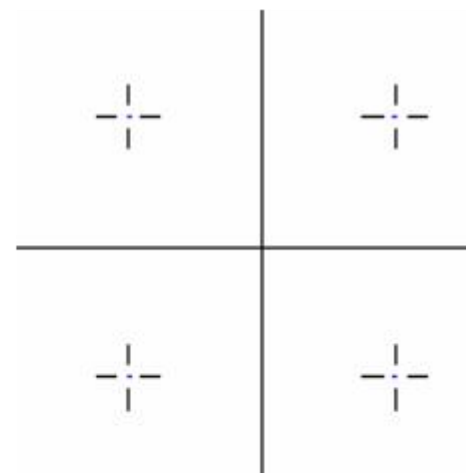
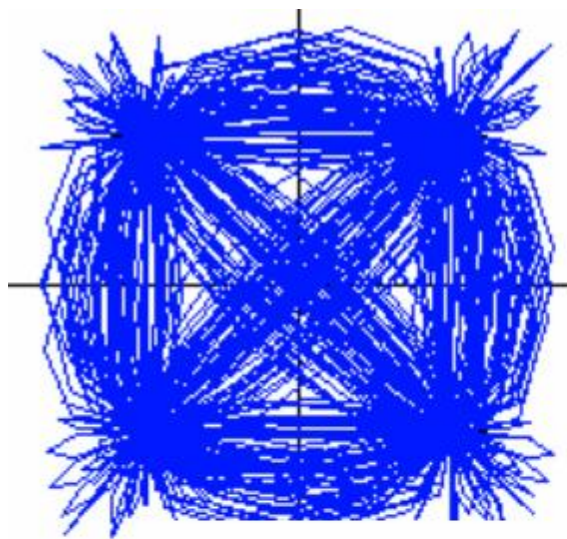
ACLR是主信号的功率与相邻信道的功率的比值,它反映宽带信号的频谱纯度.



矢量图/星座图/眼图 (QPSK)

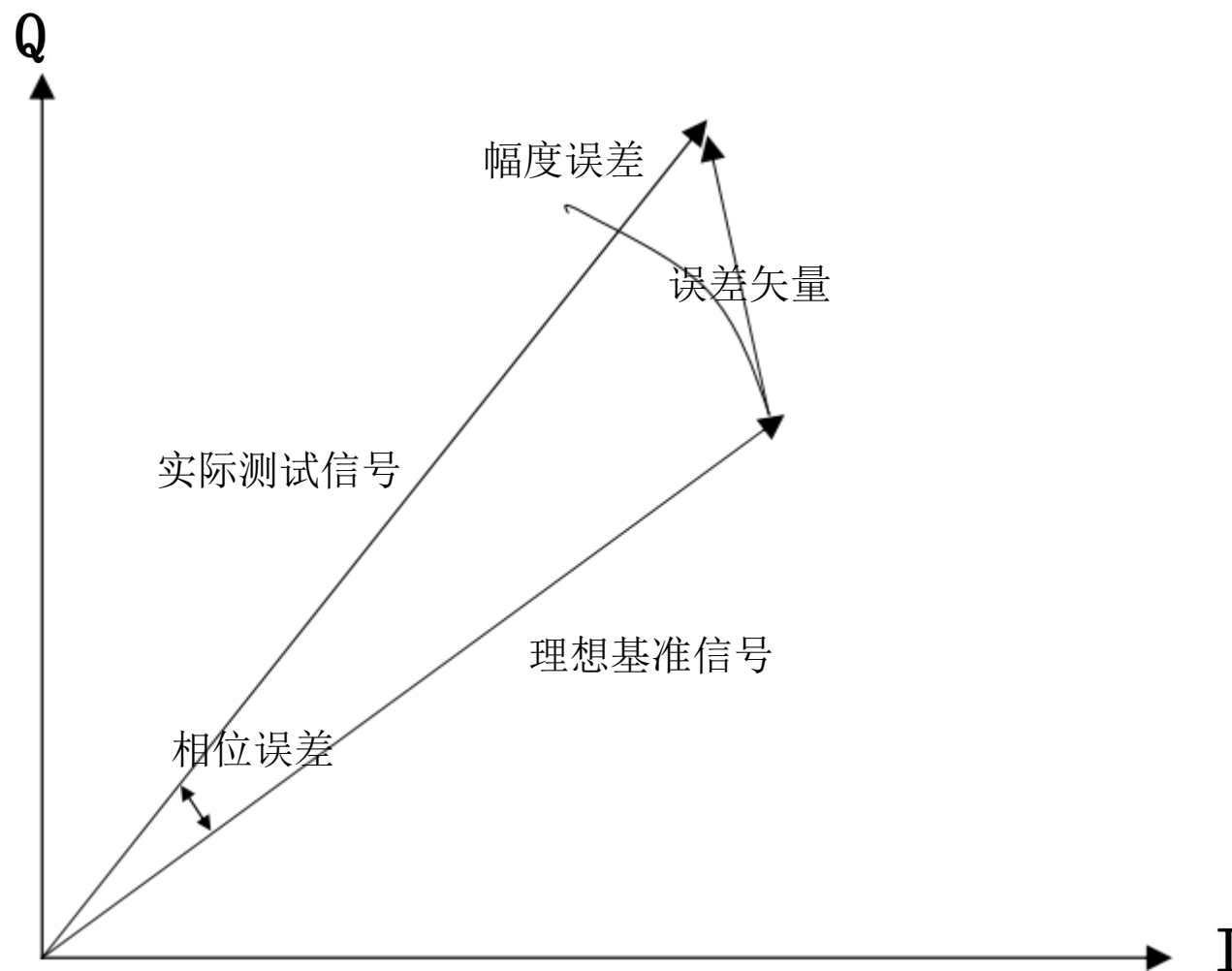


ROHDE & SCHWARZ

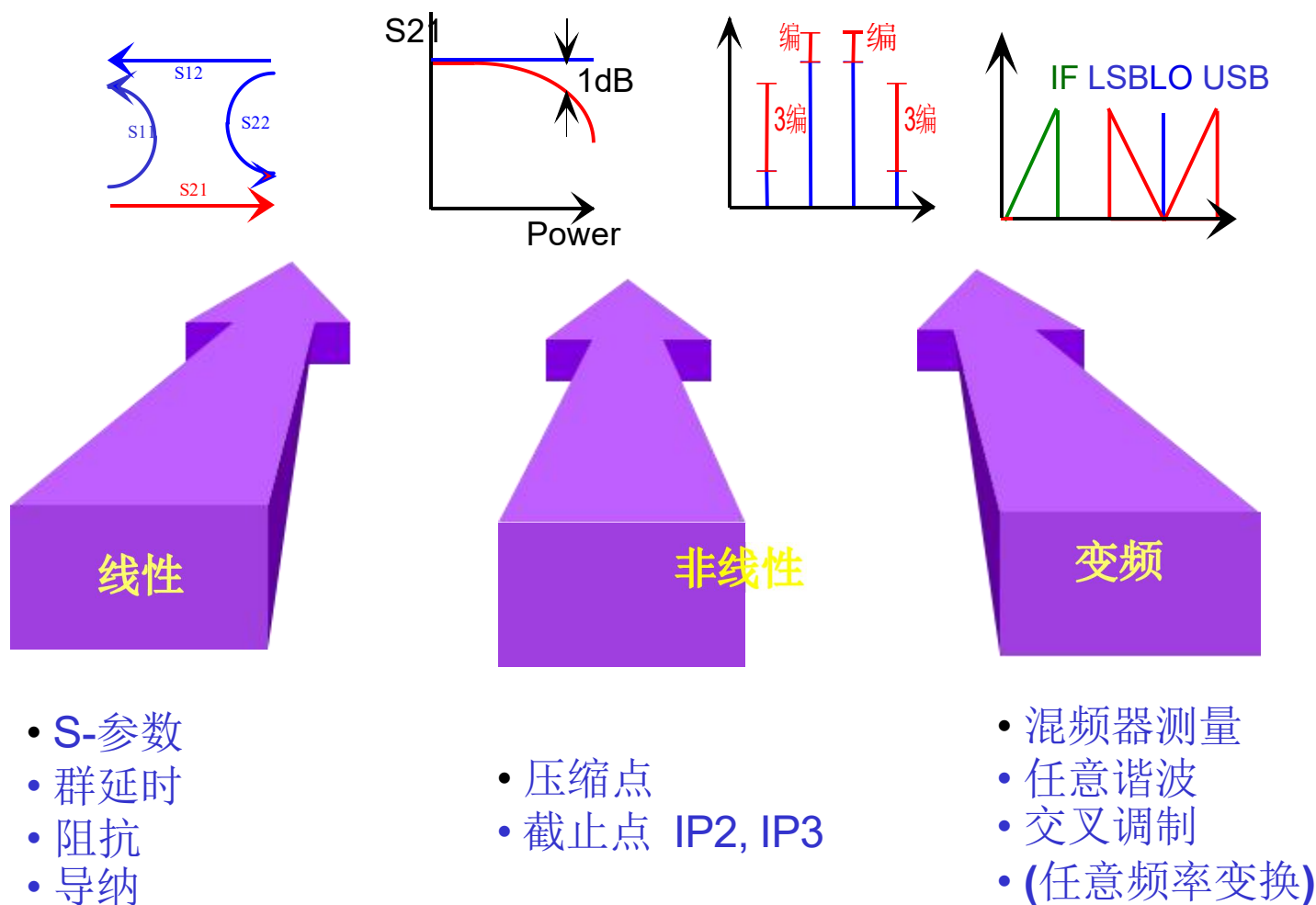


EVM: Error vector magnitude

矢量幅度误差



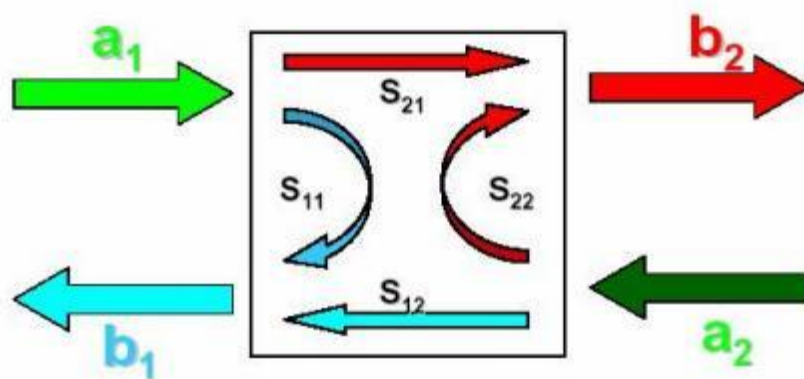
网络分析



👉 S参数

散射矩阵S参数可以完全反映高频器件的反射与传输特性。只需测得S参数，便可得到以上所需测量的参数。

（以二端口为例）。



$$\underline{b}_1 = \underline{s}_{11} \cdot \underline{a}_1 + \underline{s}_{12} \cdot \underline{a}_2$$

$$\underline{b}_2 = \underline{s}_{21} \cdot \underline{a}_1 + \underline{s}_{22} \cdot \underline{a}_2$$

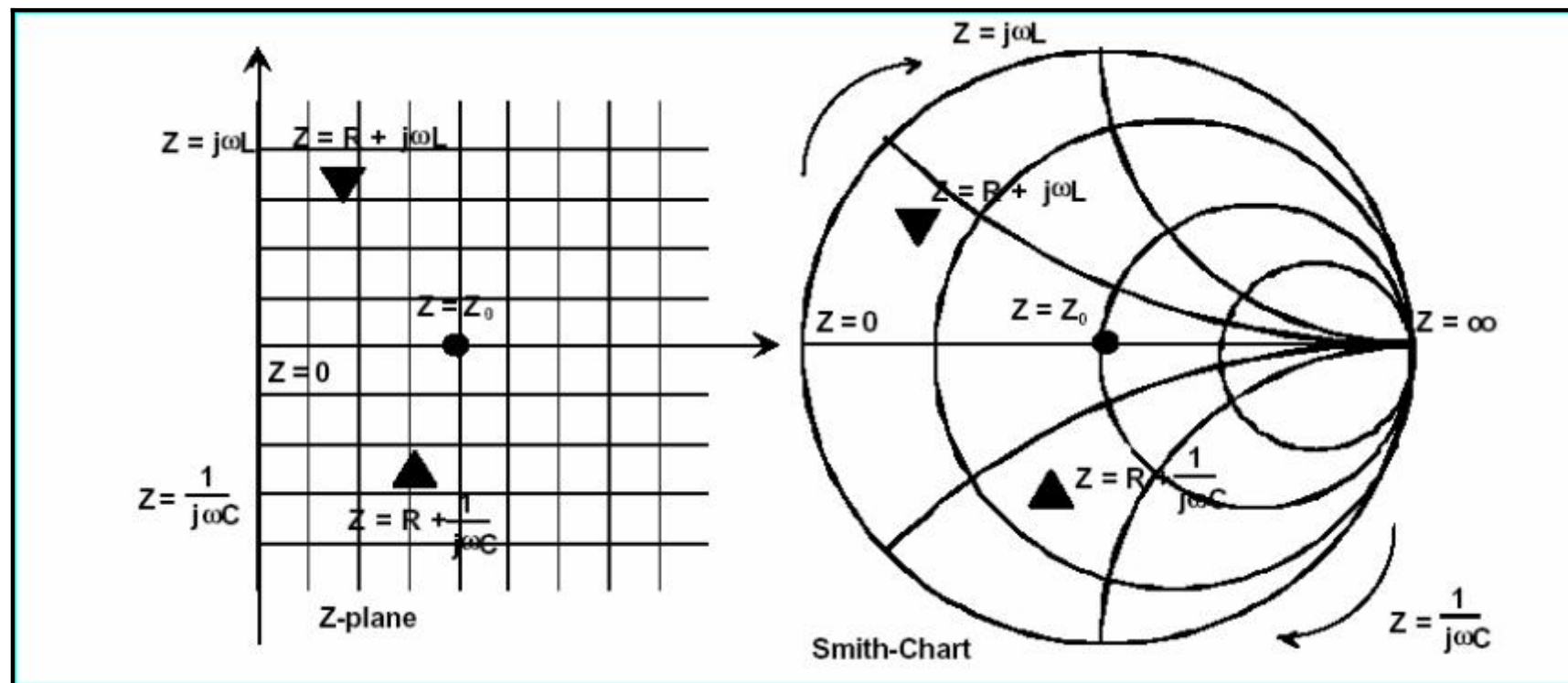
输入反射系数: $\underline{s}_{11} = \left. \frac{\underline{b}_1}{\underline{a}_1} \right|_{\underline{a}_2=0}$

输出反射系数: $\underline{s}_{22} = \left. \frac{\underline{b}_2}{\underline{a}_2} \right|_{\underline{a}_1=0}$

前向传输系数: $\underline{s}_{21} = \left. \frac{\underline{b}_2}{\underline{a}_1} \right|_{\underline{a}_2=0}$

反向传输系数: $\underline{s}_{12} = \left. \frac{\underline{b}_1}{\underline{a}_2} \right|_{\underline{a}_1=0}$

史密斯圆图



|Smith圆图的优点

|直角坐标系的虚轴映射为Smith圆图中半径为1的圆，该圆代表反射系数模值为1。

|归一化阻抗‘1’位于该圆的中心，同时代表的反射系数为0

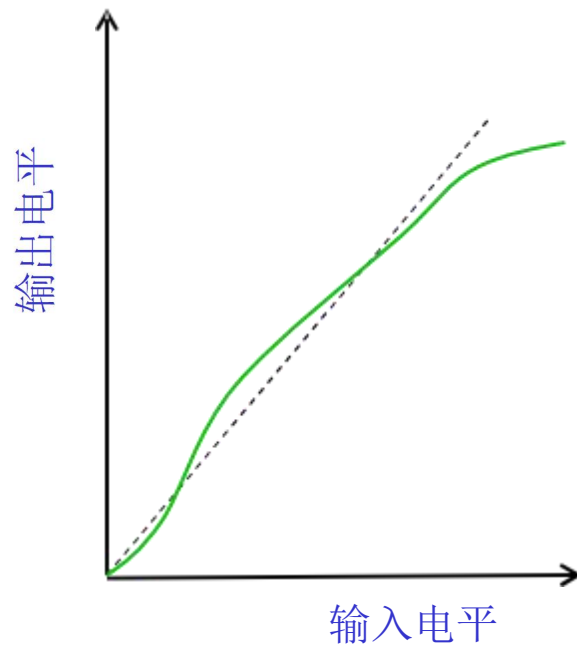
|Smith圆图的圆代表恒定电阻 R ，圆弧代表恒定电抗 X 。

|Smith圆图左顶点代表短路，右顶点代表开路。

|Smith圆图上半部分代表感抗，下半部分代表容抗。

|Smith圆图中以归一化阻抗‘1’为圆心的圆代表恒反射系数模值。

系统的非线性

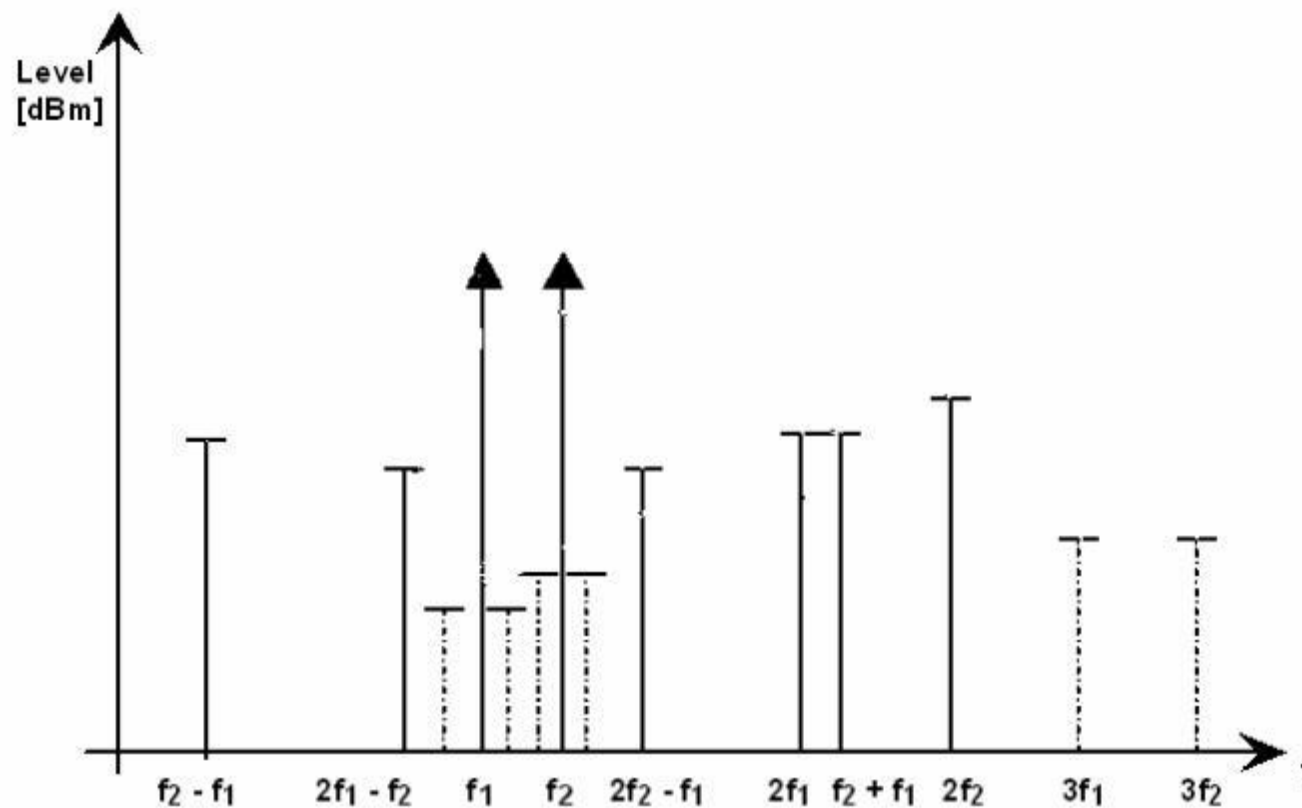


$$A'(t) = a_0 + a_1 * A(t) + a_2 * A^2(t) + a_3 * A^3(t) + \dots$$

线性失真

非线性失真

系统非线性产物



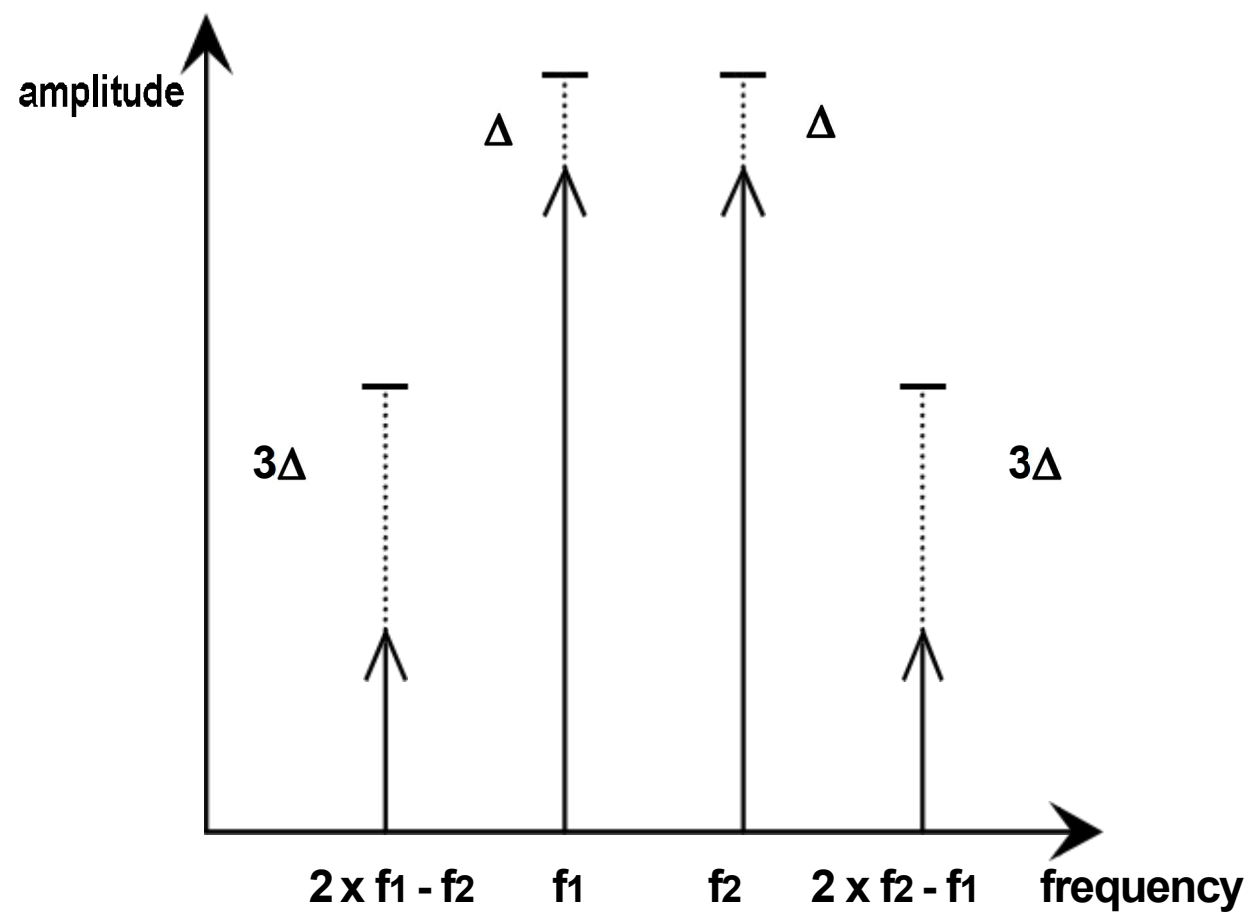
混频器的混频产物



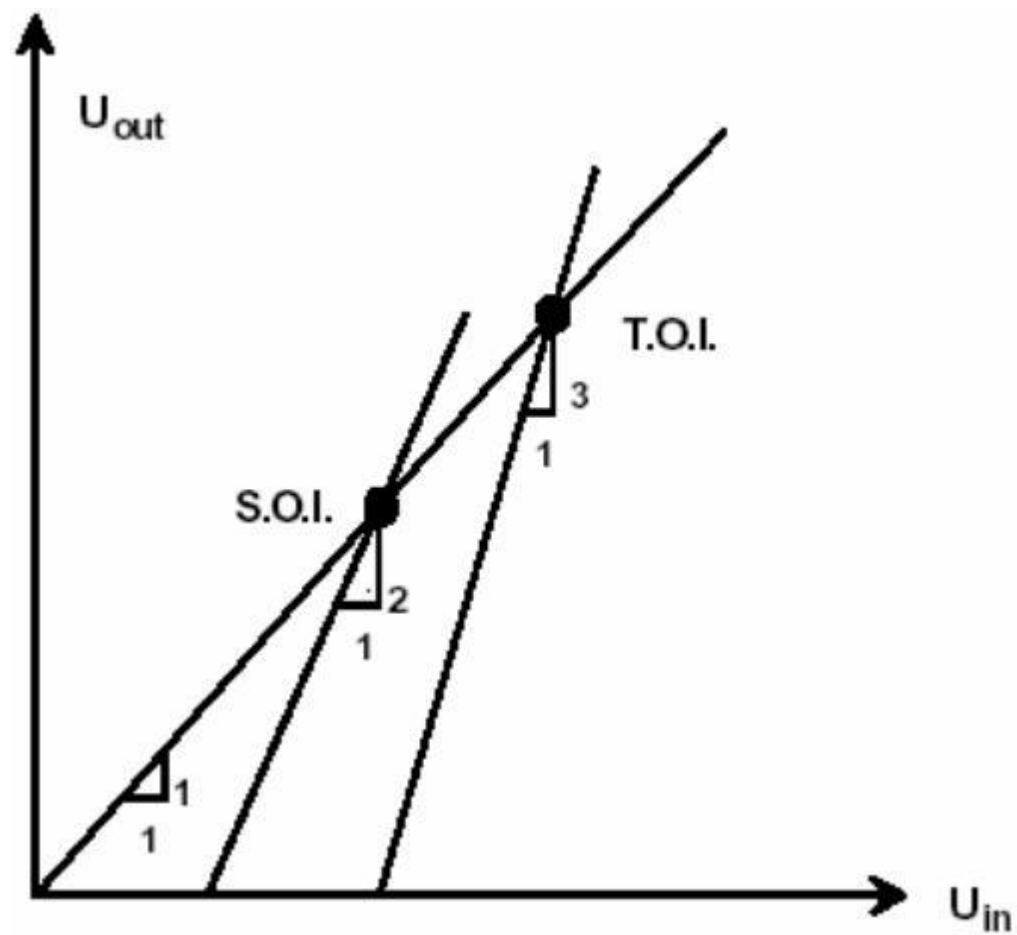
$$|m \cdot f_{LO} \pm n \cdot f_{RF}| = f_{IF}$$

f_{LO}	LO信号频率
f_{RF}	加在输入端口的RF信号频率
f_{IF}	中频
m	LO信号谐波的阶数 ($m=1,2,3\dots$)
n	输入RF信号的谐波阶数 ($n=1,2,3\dots$)

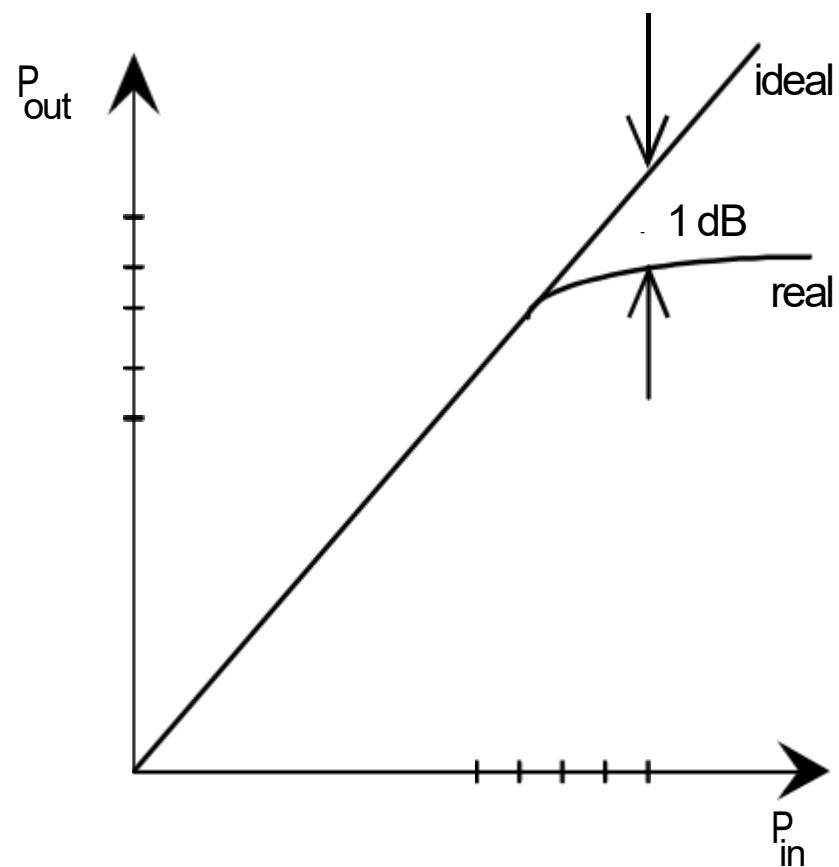
三阶互调



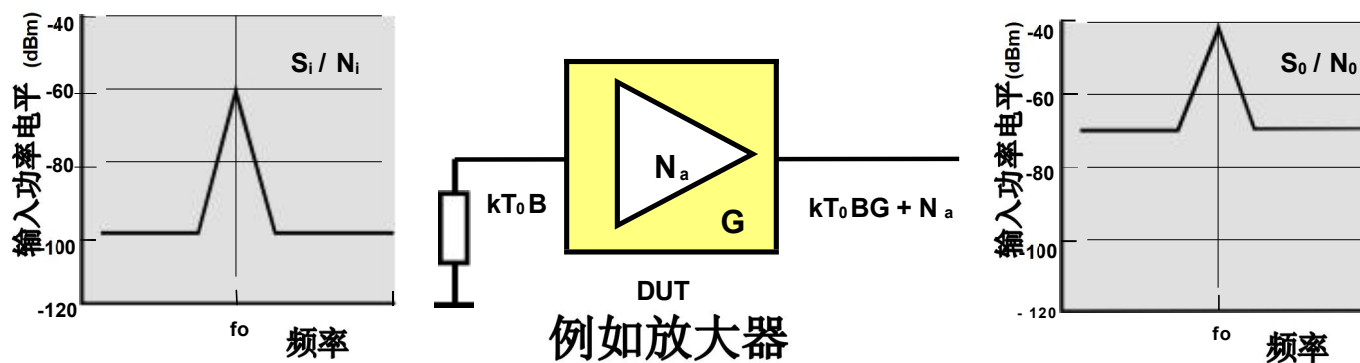
截止点(S.O.I、T.O.I)



1-dB 压缩点



噪声系数



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

IEEE 标准的定义:

噪声系数F是输入信号的信噪比和输出信号的信噪比的比值

6.RX/TX的测量

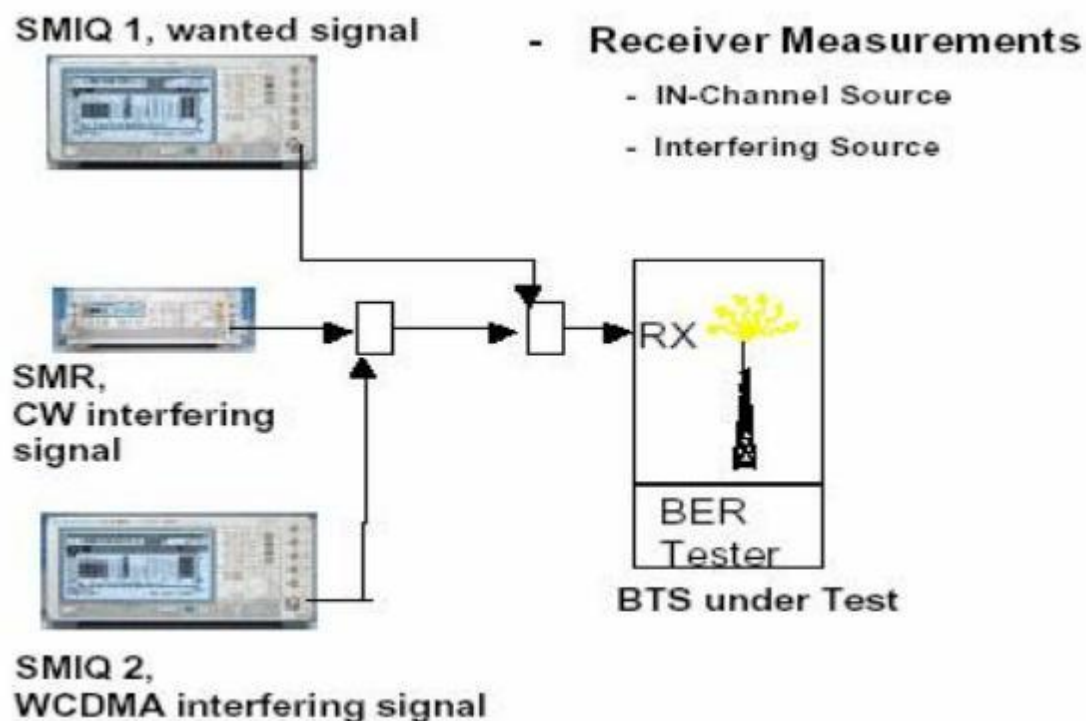


6.1.接收机测量

6.2.发射机测量

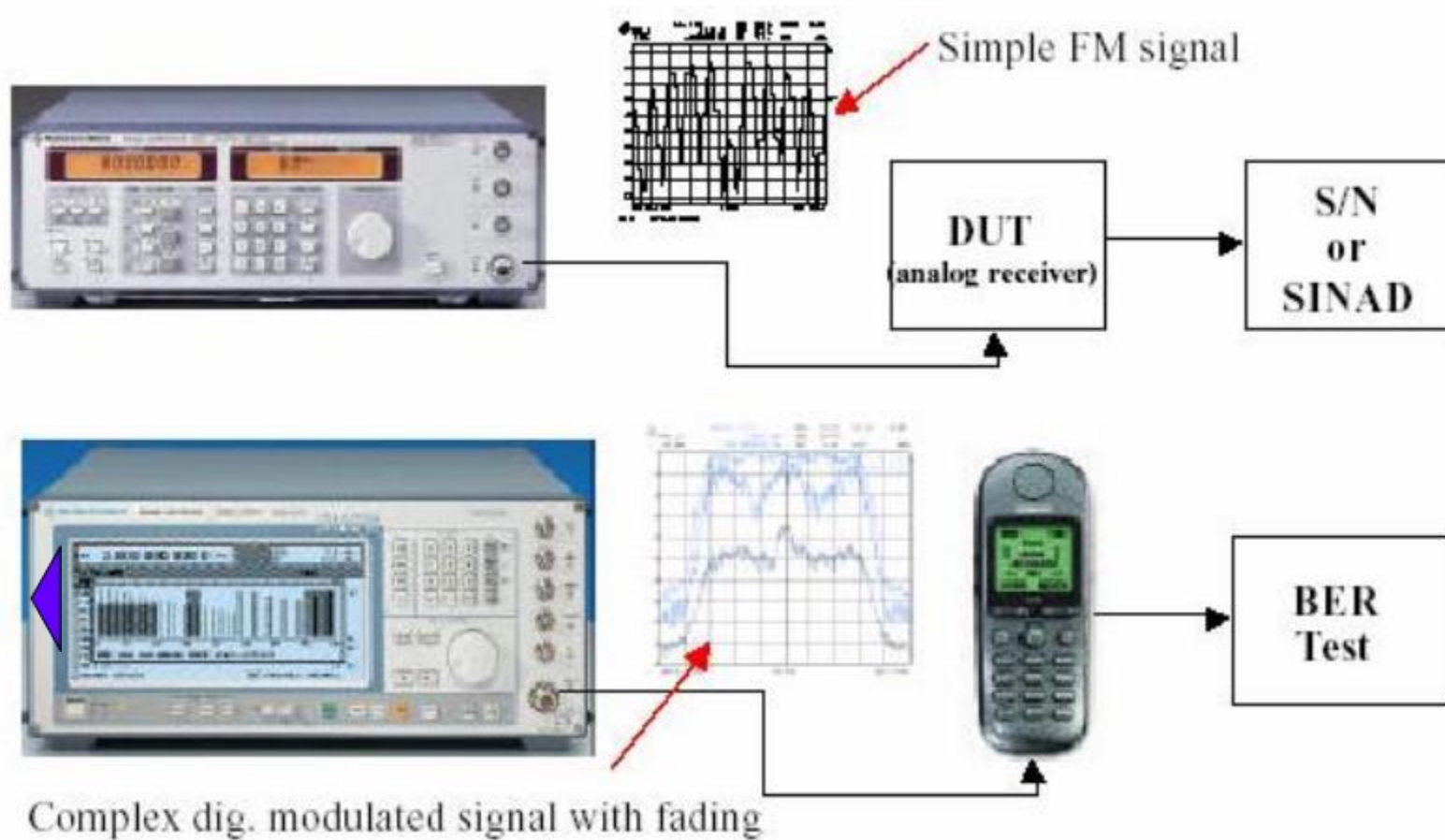
接收机测量

1. 灵敏度
2. 邻道选择性
3. 共信道抑制
4. 邻信道抑制
5. 交调抑制
6. 杂散响应抑制
7. 阻塞特性

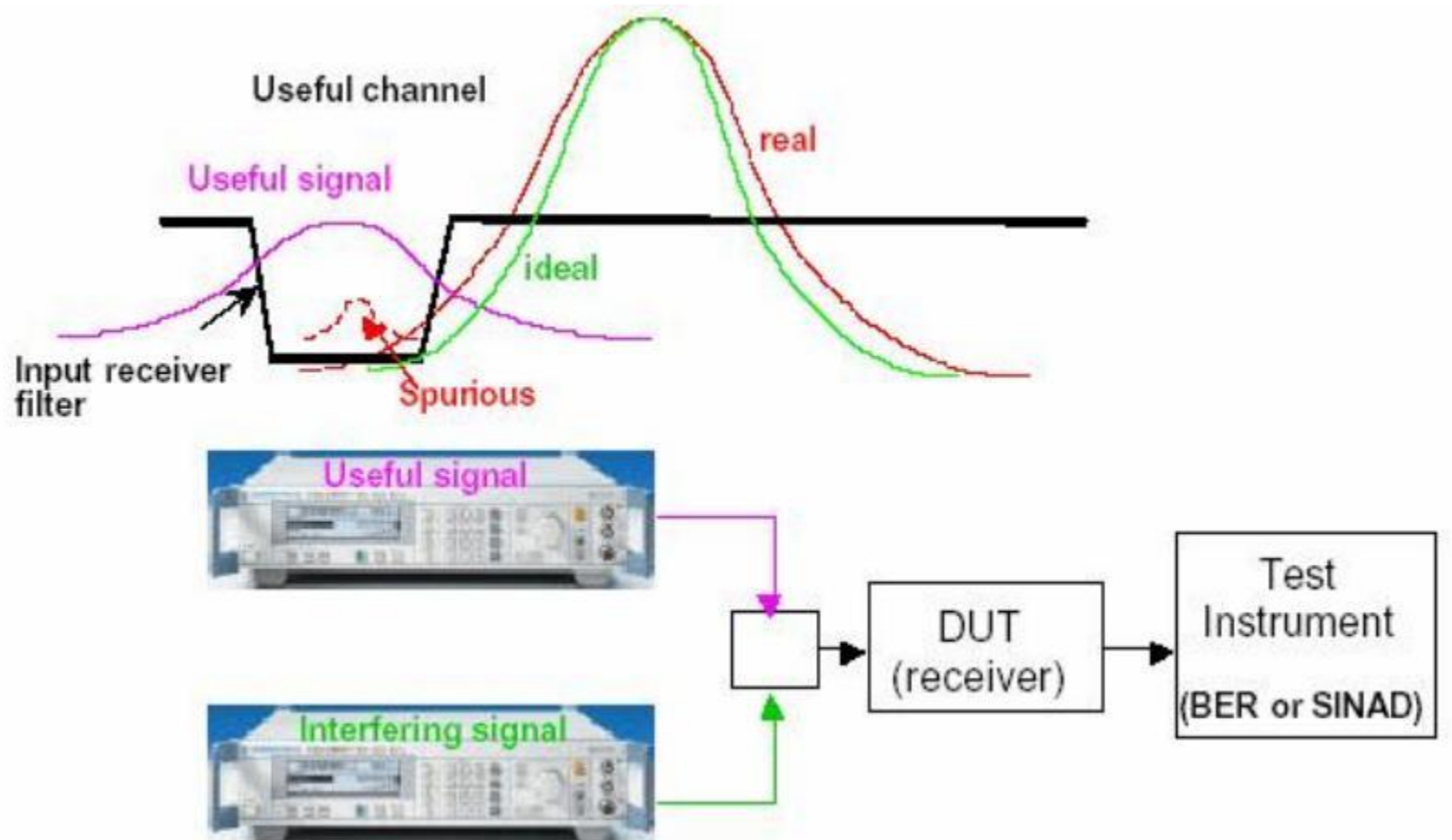


接收机测量 / 灵敏度(最小接收电平)

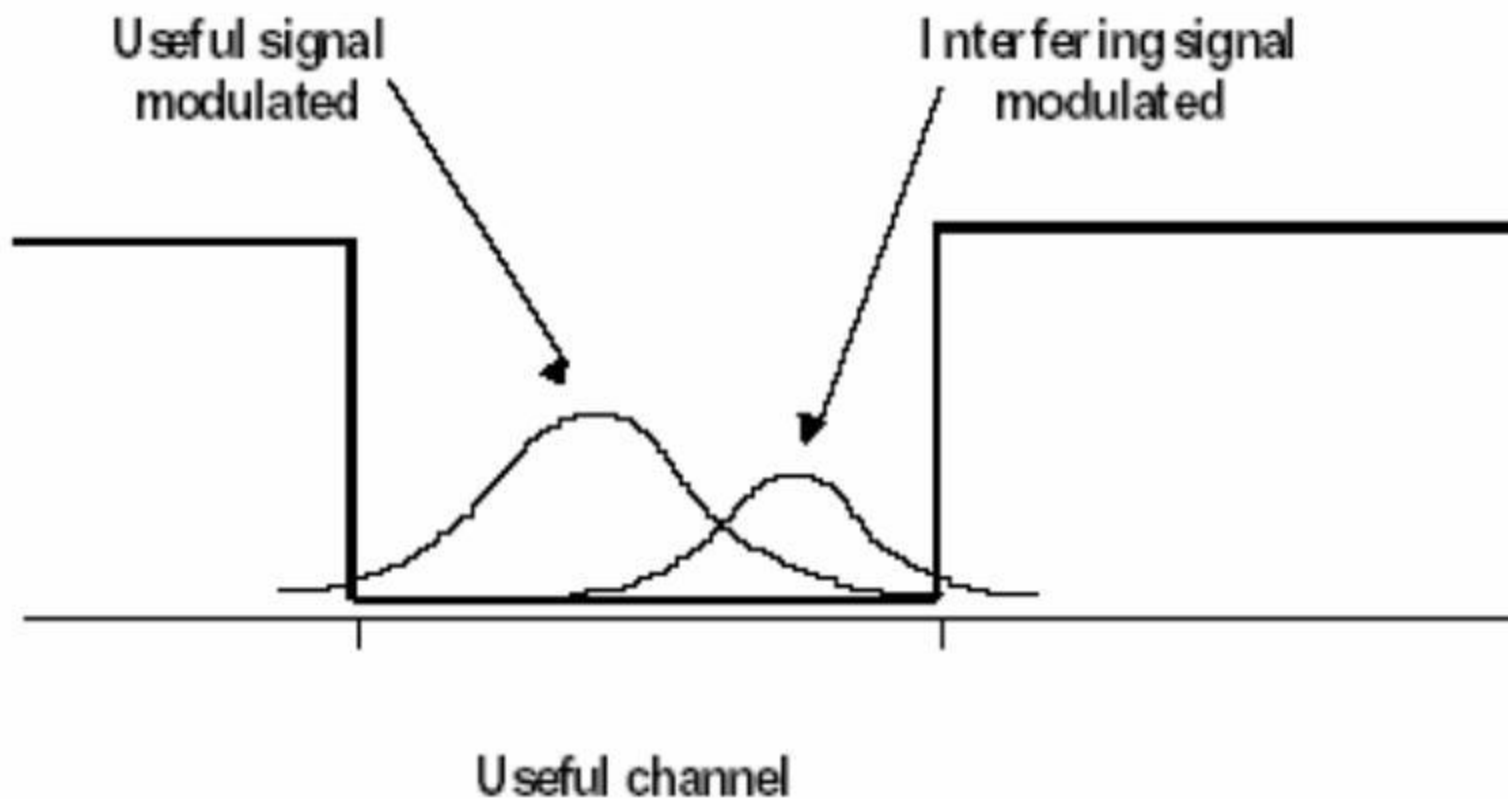
接收机测量 / 最大接收电平



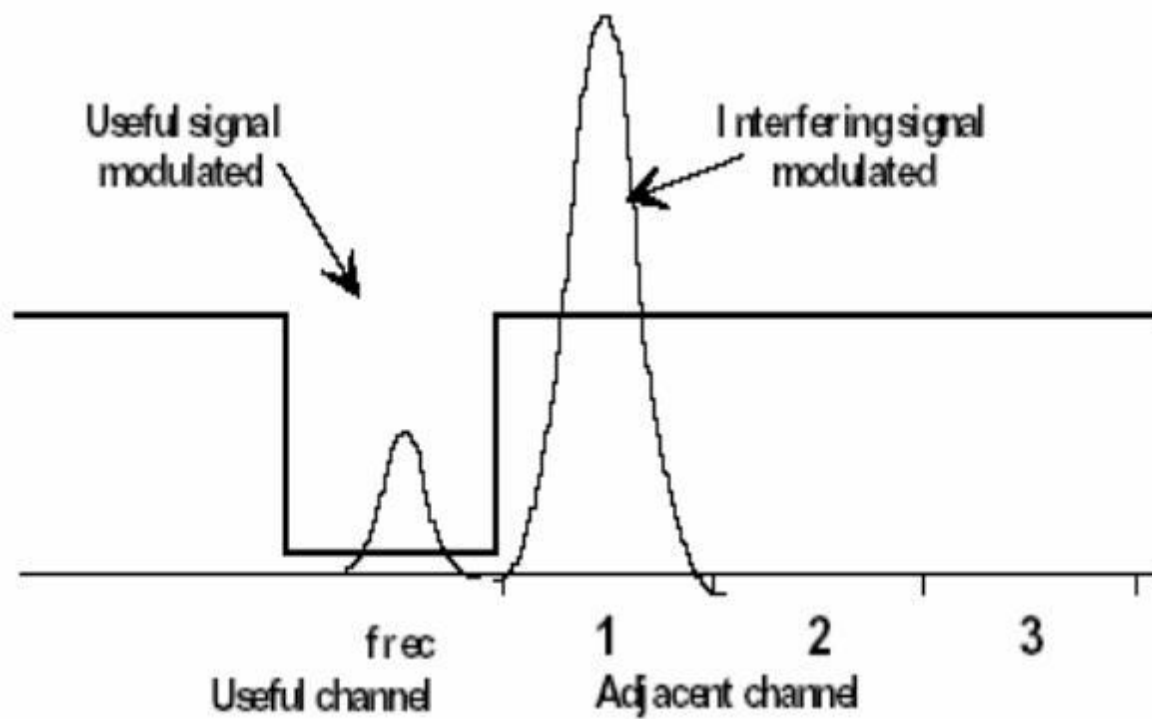
接收机测量 / 邻道选择性



接收机测量/ 共信道抑制、同频抑制

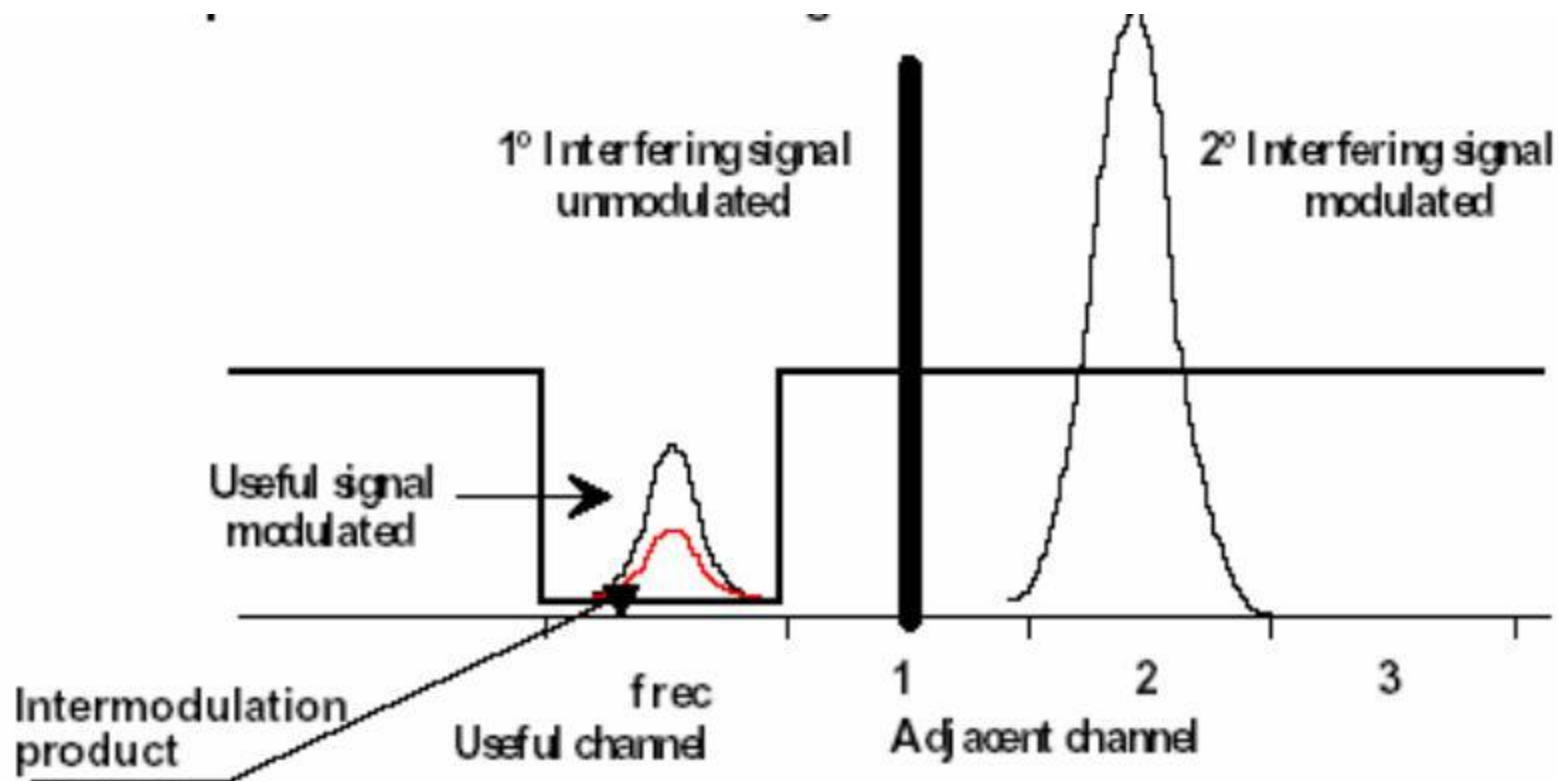


接收机测量 / 邻信道抑制



接收机测量 / 交调抑制

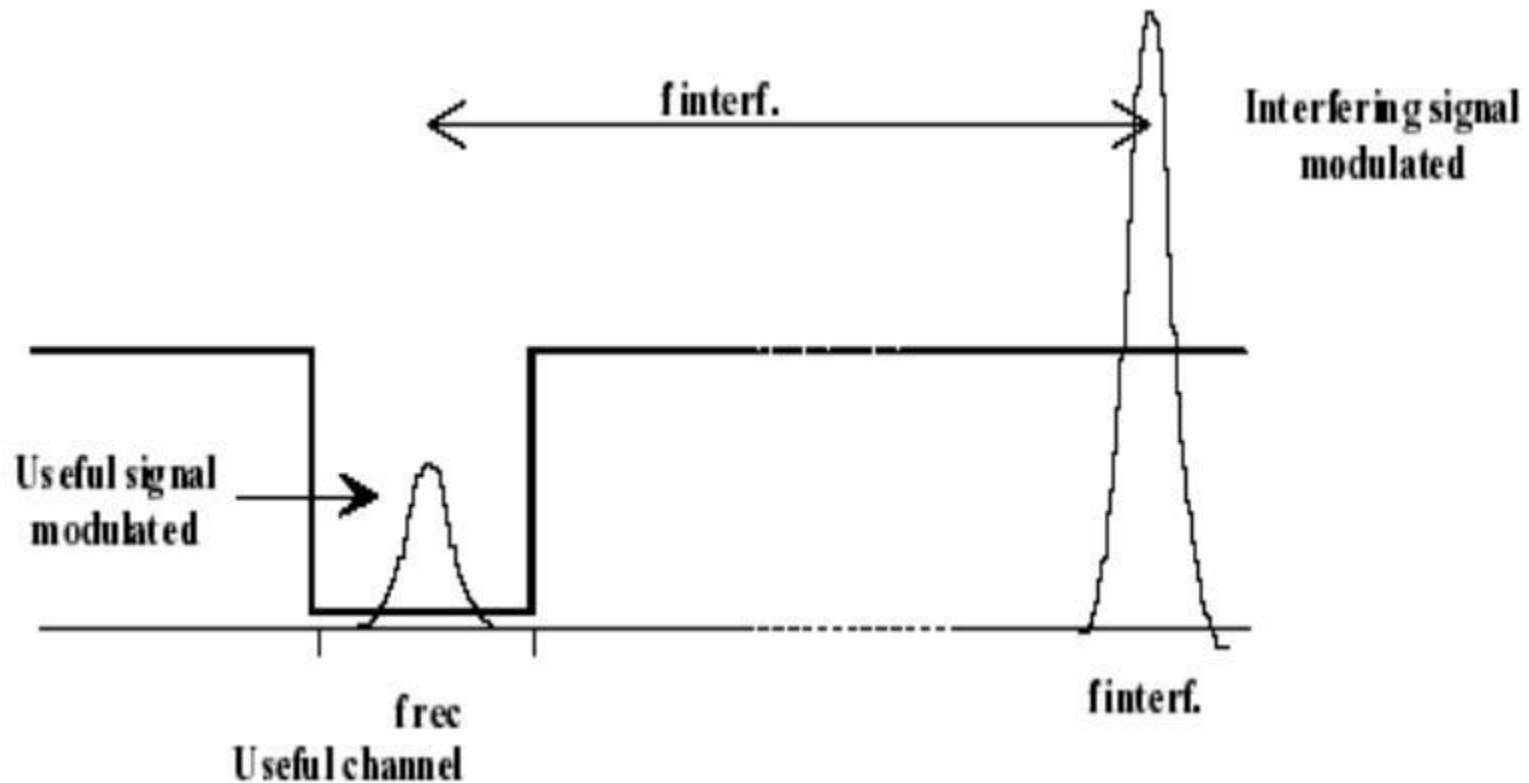
用来测试接收机在抑制几个RF信号的交调产物的性能



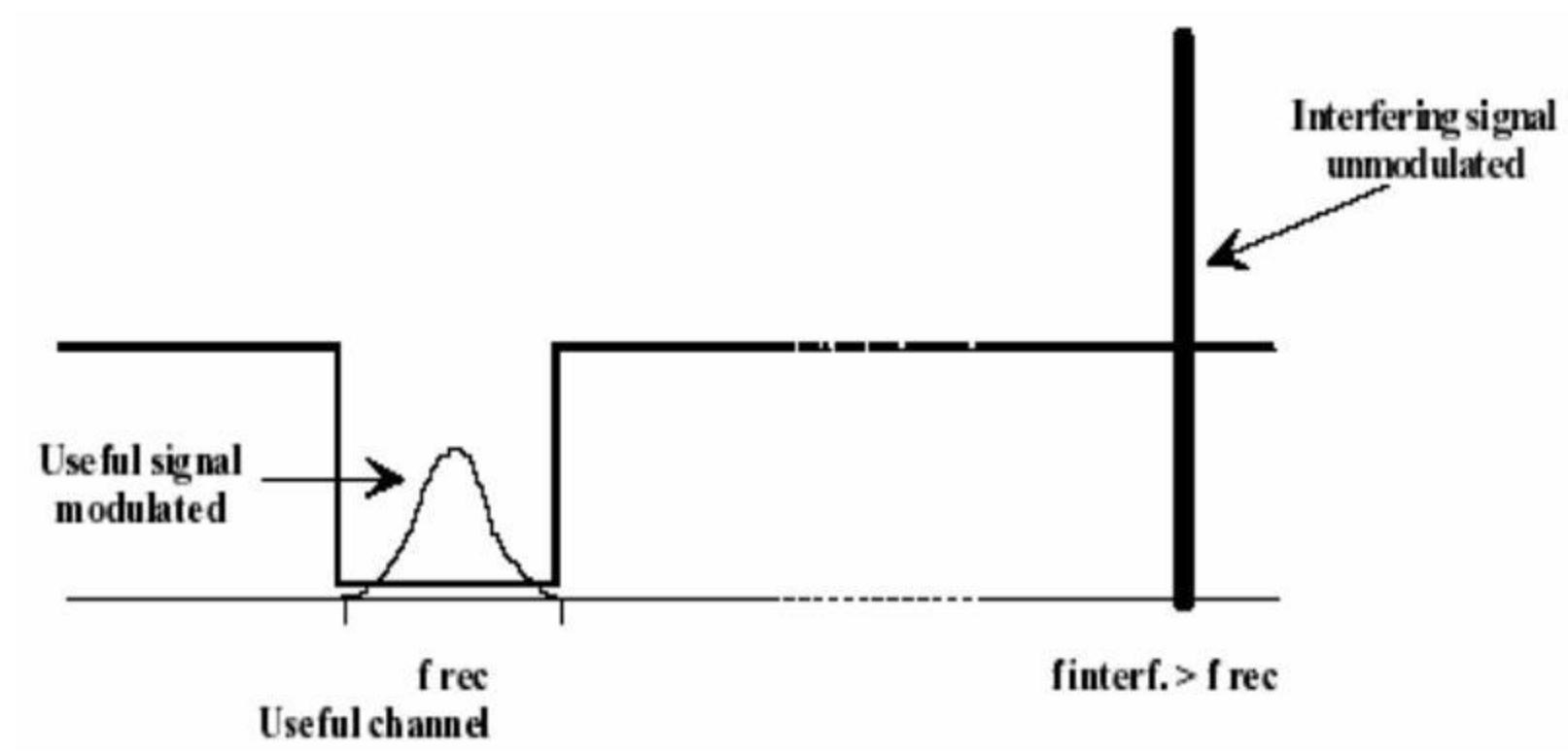
接收机测量 / 杂散响应抑制



ROHDE & SCHWARZ



接收机测量 / 阻塞特性



发射机测量



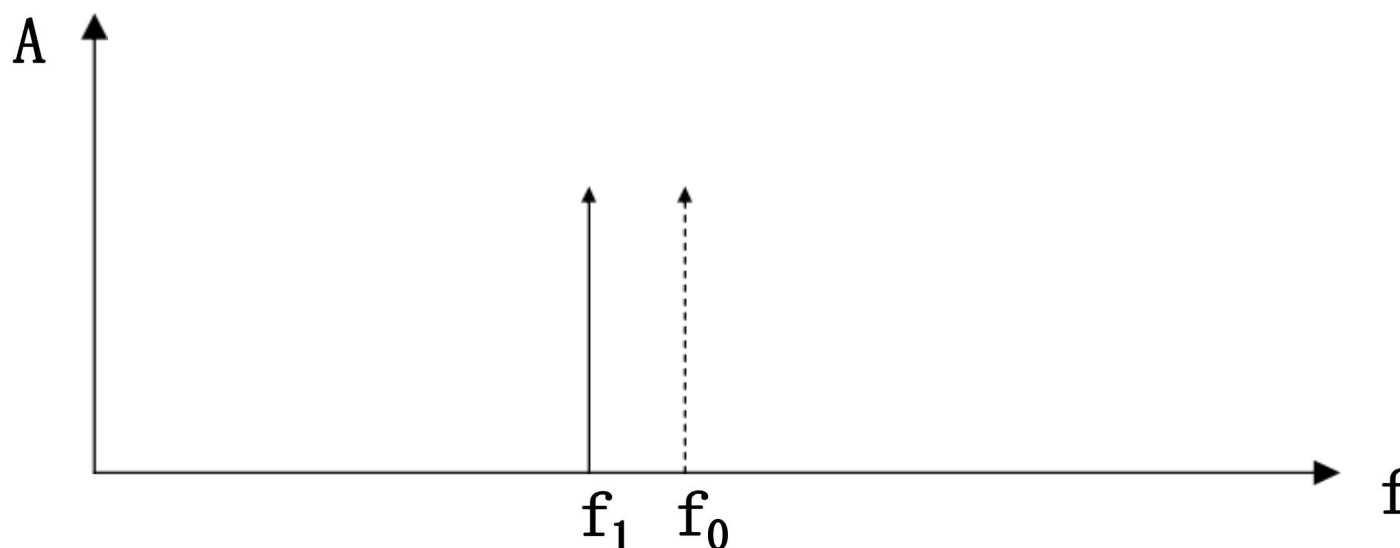
- 1.中心频率偏移
- 2.杂散
- 3.占用带宽
- 4.发射频谱模板
- 5.输出功率



发射机测量/中心频率偏移



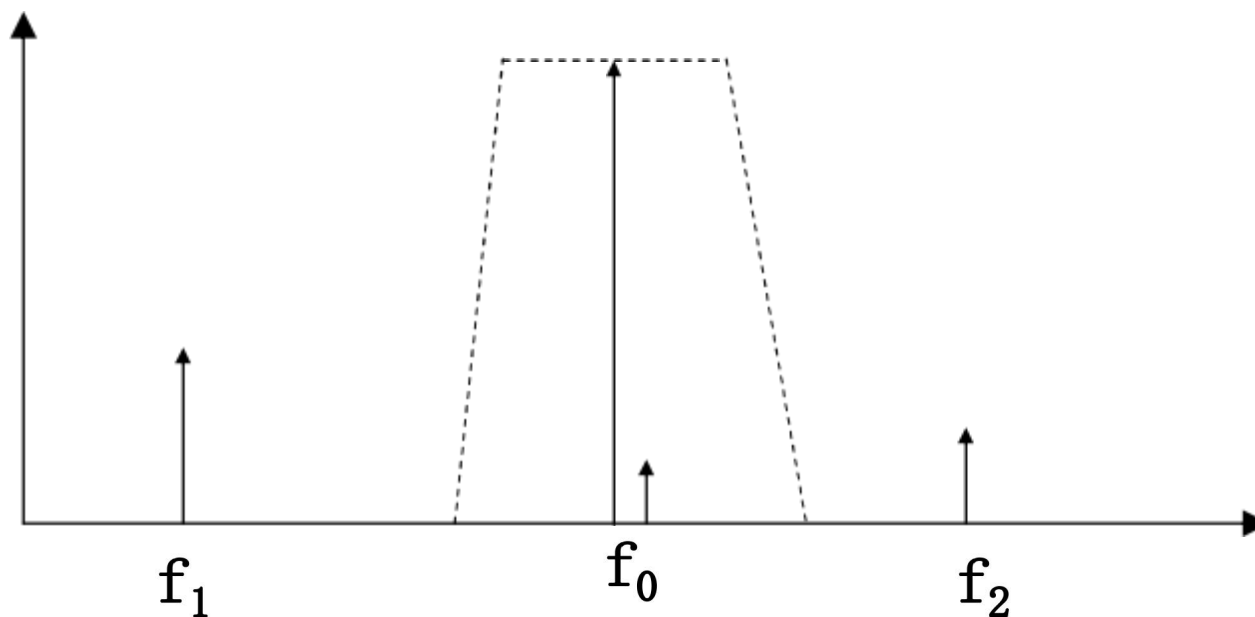
1. 用来测量DUT的中心频率误差
2. 度量值为: 偏离频率/中心频率 $= (f_0 - f_1)/f_0$
3. 单位为: ppm $= 10^{-6}$
4. 中心频率漂移会造成接收机误码率升高, 甚至无法接收, 还会对其他设备进行干扰。



发射机测量/杂散



1. 有用信号以外的任何信号都称为杂散信号
2. 分为带内杂散和带外杂散, 对其他无线电设备是一个干扰源, 必须严格限制。
3. 频谱仪测量杂散时, 使用最大保持 (maxhold)

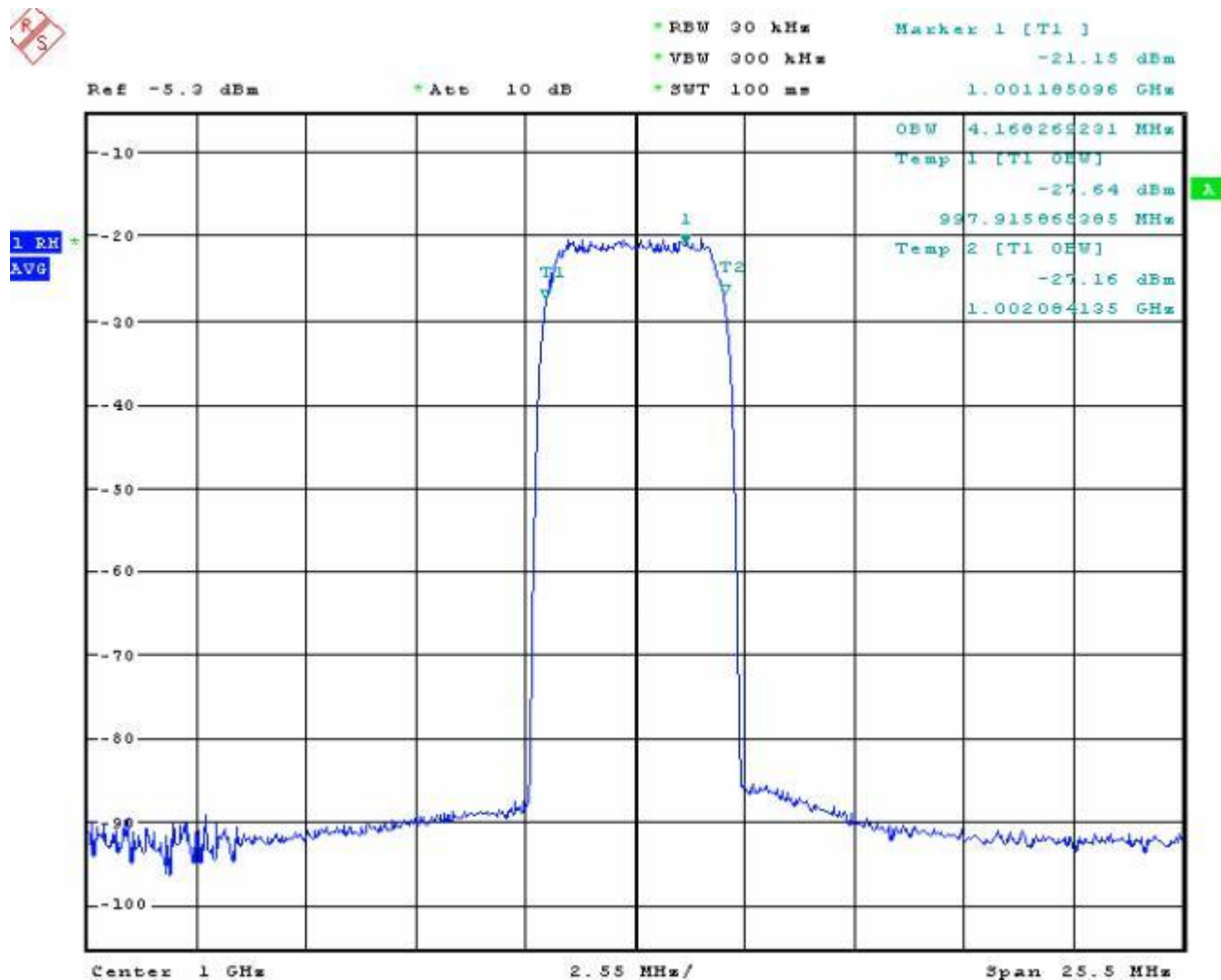


发射机测量/占用带宽OBW



- 1.OBW:occupied bandwidth
- 2.实际信号的频谱所占用的带宽是无穷大的.
- 3.其中99%的能量集中在很窄的带宽内，1%的功率分布在很宽的频带内.
- 4.OBW为总功率的99%（通常情况）所占用的带宽.
- 5.OBW主要考验发射机的中频滤波特性，抑制发射机在邻近的信道有功率泄漏，造成邻道干扰。

OBW



发射机测量 / 发射频谱模板



主要用于限制发射机的频谱扩散到邻近信道的信号强度

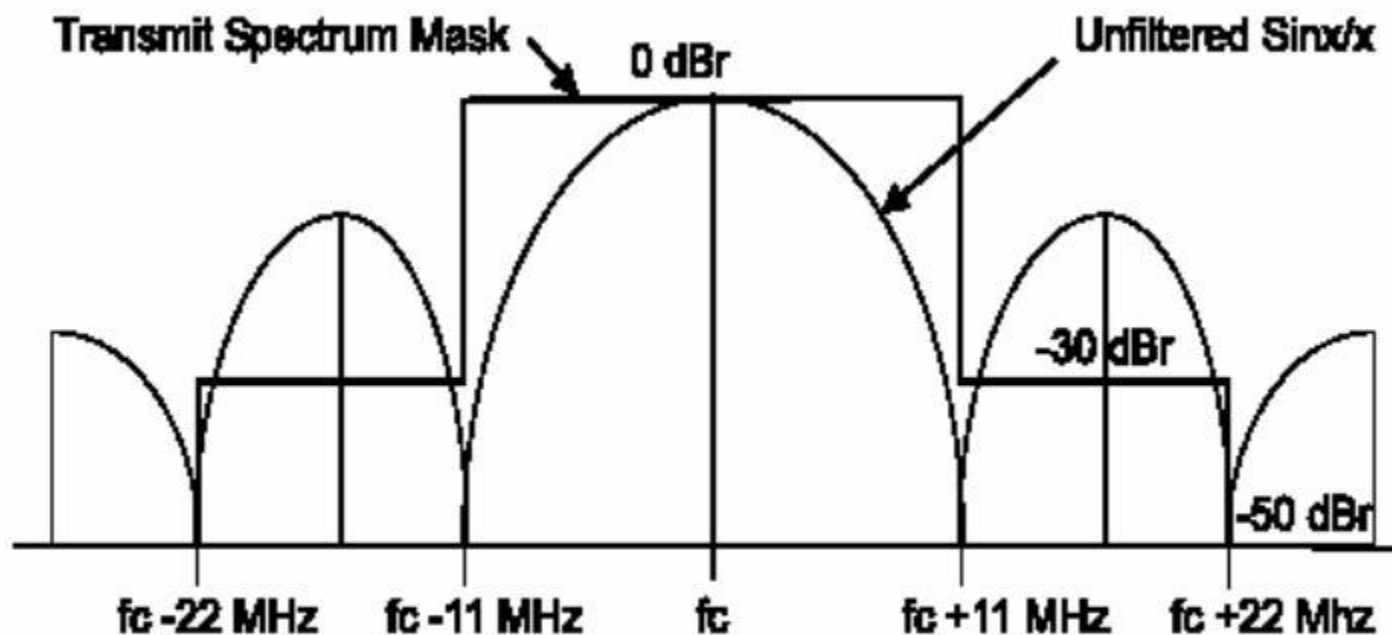
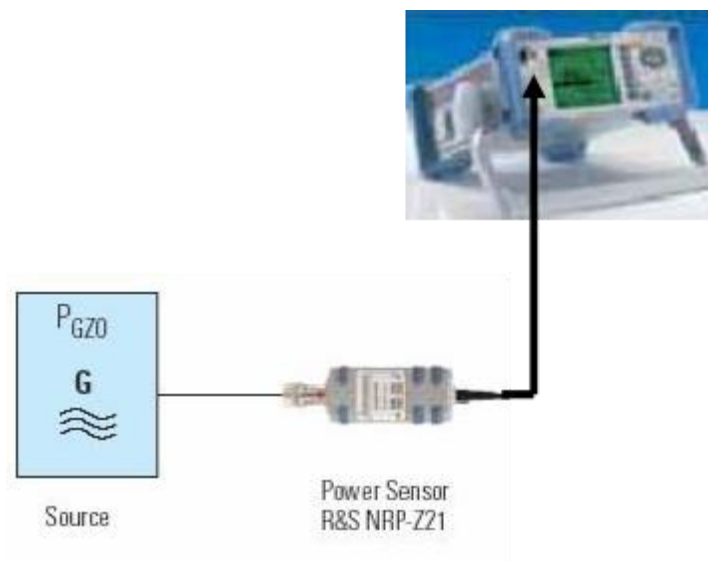
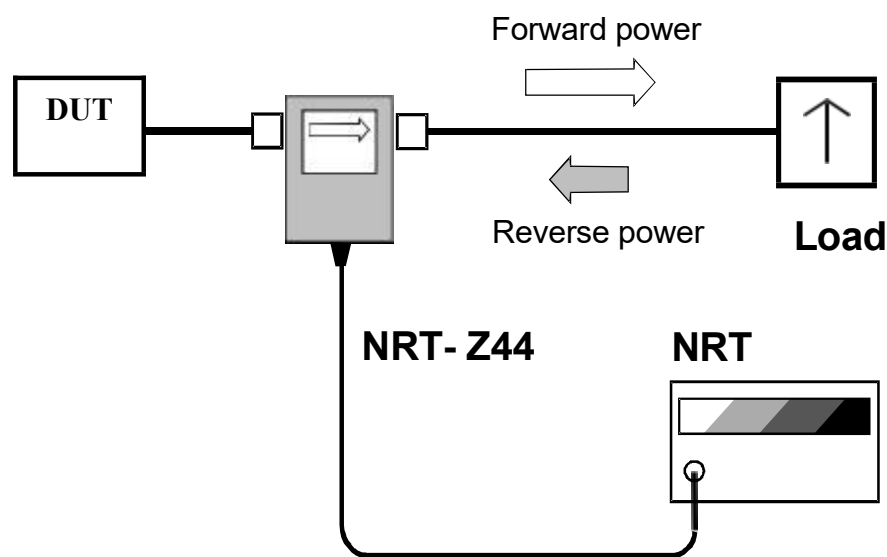


Figure 145—Transmit spectrum mask

发射机测量 / 输出功率

1. 主要用于限制发射机的输出功率。太小，正常的通信质量不能保证；太大，干扰其他设备正常工作。
2. 小功率测量，使用吸收式功率计。
3. 大功率测量，采用通过式功率计。



仪器使用安全准则



1. 仪器电源使用三相接头,仪器之间接地良好.
2. 仪器散热良好.
3. 仪器上面不能放重物.
4. 不宜频繁开关仪器.
5. 频谱仪输入大功率时慎重.
6. 信号源不使用时关闭输出.
7. 防静电和高电压.

R&S 信号源 SMU200A



特点:图形化的操作界面,支持鼠标操作,内置有20Gb硬盘,在线帮助功能. 输出信号频谱纯度高,相位噪声低,电平精度高,输出功率大.

R&S 频谱仪 FSP/FSU



应用:测量信号的频谱,分析WCDMA/CDMA/GSM/WLAN/Bluetooth标准信号. TOI大,底噪低,动态范围大.

R&S 信号分析仪 FSQ



主要特性:具有频谱仪FSP/FSU的功能,能够对任何调制信号进行解调分析,比如星座图/矢量图/眼图等,解调带宽为28MHz,能够满足所有移动通信设备的发射机测试需求.

R&S 功率计NRP



特点:测量连续信号/BURST/时分信号的平均功率,能够同时连接四个探头测量4个不同点的功率,测试准确度高,动态范围达到90dB.

R&S 矢量网络分析仪 ZVB



特点:测量2/3/4端口网络的S参数和平衡器件的特性. 界面操作方便, 友好, 接口丰富, 支持鼠标.

深圳市故得电子科技有限公司

地址： 深圳市龙华区观澜街道观光路天成大厦822

电话： (0755) 28016601

移动： 13923788707

邮编： 518110

Email: gude18@foxmail.com

网址: www.gude18.com