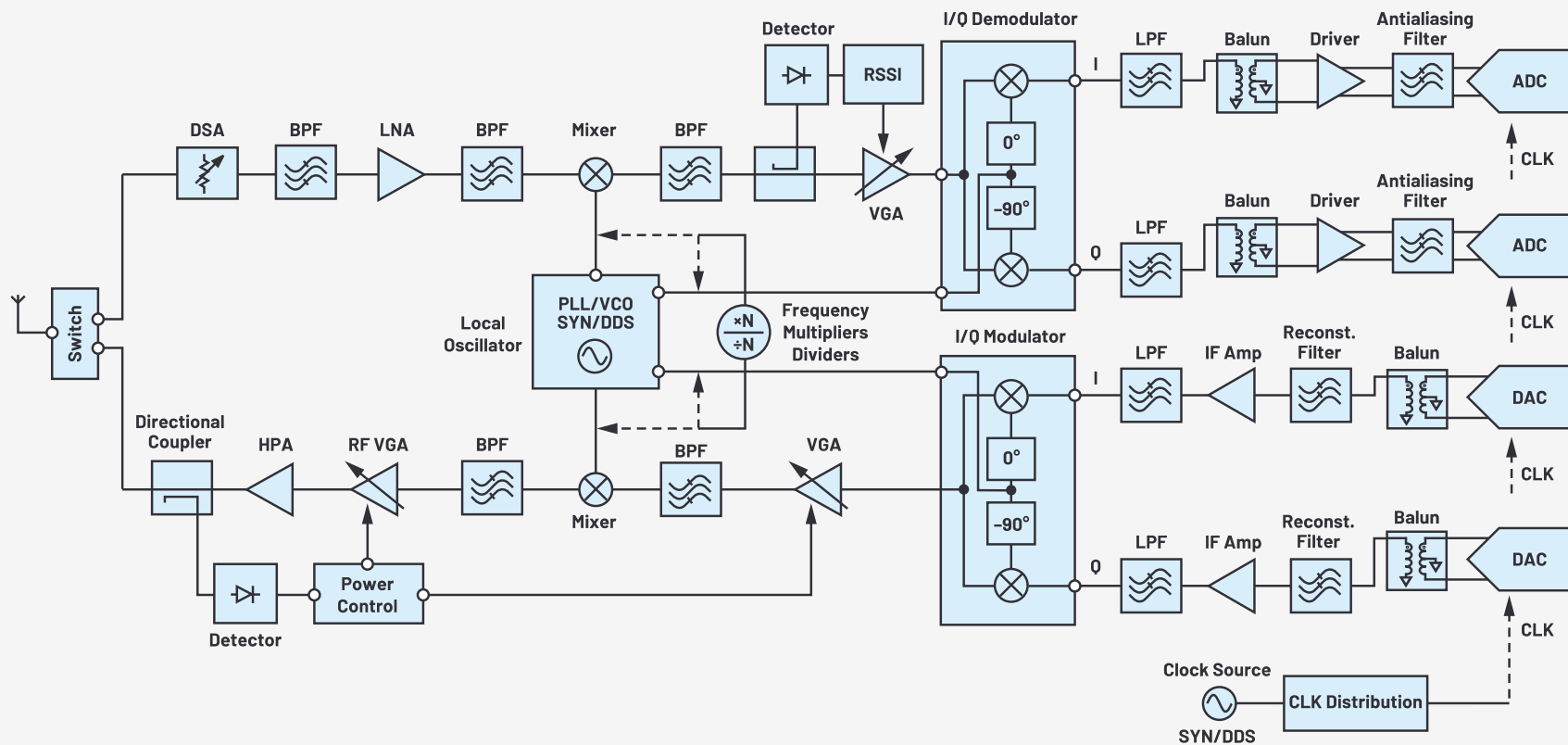


# RF

RF表示射频，此术语的通用定义规定了特定的频率范围：MHz至GHz电磁频谱。

RF的突出特性包括相移、电抗、耗散、噪声、辐射、反射和非线性，术语RF适用于许多具有构成此定义特性的任何电路或组件。



# S参数

- 分布式元件电路、集总电路

取决于电路中RF波长，高频RF系统中波长较短，需按照分布式原件电路模型分析来体现电路中的相位偏移。

- 回波损耗、反射系数、电压驻波比

插入损耗：Insert Loss

回波损耗：Return Loss

回波损耗与电压驻波比计算：

回波损耗始终是非负值

$$\text{电压驻波比: } VSWR = \frac{V_{1\max}}{V_{1\min}} = \frac{V_1^+ + V_1^-}{V_1^+ - V_1^-}$$

$$\text{反射系数} |\Gamma| = \frac{V_1^-}{V_1^+} = \frac{VSWR-1}{VSWR+1}, \quad RL = -20\log |\Gamma|$$

$$\text{比如, } VSWR = 17.391, \quad \frac{V_1^-}{V_1^+} = 0.891, \quad RL = -20\lg \frac{V_1^-}{V_1^+} = 1\text{dB}$$

- S矩阵

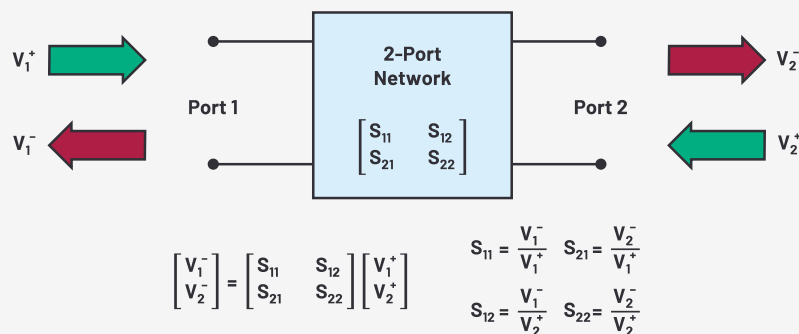
S21：端口1到端口2的传输系数

|S21|：输出功率与输入功率的比值，称为增益或标量对数增益

S11、S22：反射系数|Γ|

反射系数与回波损耗：RL=-20log |Γ|（回波损耗始终是非负值）

（IL和RL与S参数的这种简单关系只有在所有端口都匹配的情况下才有效）



# 带宽

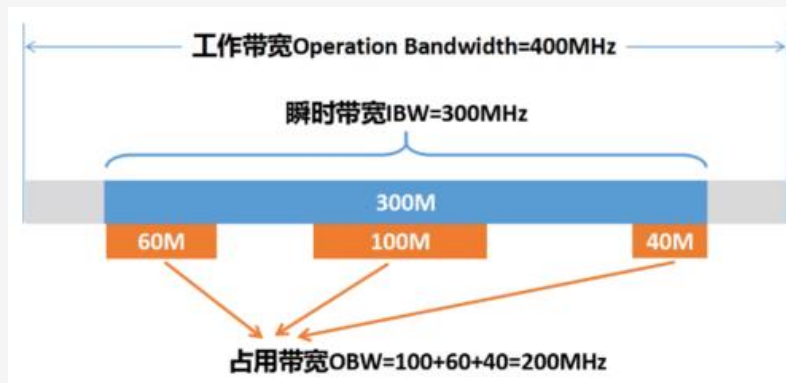
- **OBW IBW**

RF信号链的带宽很大程度上取决于其模拟前端，以及高速模数转换器或数模转换器的采样速率和带宽

Instantaneous Bandwidth, 瞬时带宽

Operating Bandwidth, 工作带宽

Occupied Bandwidth, 占用带宽, 华为FDD产品无OBW指标



- **频率范围和带宽**

3 dB带宽: 信号功率电平超过其最大值一半的频率范围。

瞬时带宽(IBW)或实时带宽: 系统在不需重新调谐的情况下能够产生或获取的最大连续带宽。

占用带宽(OBW): Occupied BW, 包含总集成信号功率特定百分比的频率范围。

分辨率带宽(RBW): 指两个频率分量(可继续分解)之间的最小间隔。例如, 在频谱分析仪系统中, 它是最终滤波器级的频率范围。

# 非线性

## 非线性

- ✓ RF网络的功率电平持续升高通常会带来更明显的非线性效应，最终导致其性能下降。
- ✓ 一旦系统处于非线性模式，就会使信号失真、产生杂散频率分量，或者杂散。杂散是相对于载波信号（单位：dBc）的电平进行测量，可以分为谐波和交调产物。谐波是处于基波频率的整数倍位置的信号（例如，H1、H2、H3谐波），而交调产物是非线性系统中存在两个或更多基波信号时出现的信号。如果第一个基波信号位于频率 $f_1$ ，第二个位于 $f_2$ ，则二阶交调产物出现在两个信号的和频和差频位置，即 $f_1 + f_2$ 和 $f_2 - f_1$ ，以及 $f_1 - f_1$ 和 $f_2 + f_2$ （后者也称为H2谐波）。二阶交调产物与基波信号相结合，会产生三阶交调产物，其中两个（ $2f_1 - f_2$ 和 $2f_2 - f_1$ ）特别重要，由于它们接近原始信号，因此难以滤除。包含杂散频率分量的非线性RF系统的输出频谱表示了交调失真(IMD)，这是描述系统非线性度的一个重要术语。
- ✓ 与二阶交调失真(IMD2)和三阶交调失真(IMD3)相关的杂散分量会对目标信号造成干扰。用于量化干扰严重程度的重要指标为交调点(IP)。我们可以区分二阶(IP2)和三阶(IP3)交调点。如图所示，它们定义输入（IIP2、IIP3）和输出（OIP2、OIP3）信号功率电平的假设点，在这些点上，相应的杂散分量的功率将达到与基波分量相同的电平。虽然交调点是一个纯数学概念，但它是衡量RF系统对非线性度耐受性的重要指标。

- ✓ 线性区输出功率： $P_{OUT} = \text{Gain} \cdot P_{IN}$
- ✓ 1dB压缩点： $OP1_{dB} = \text{Gain} \cdot IP1_{dB} - 1$ （非线性系统实际增益曲线确定）
- ✓ IMN计算： $IIPn = PIN + \Delta P / (n - 1)$ ,  $OIPn = PIN + G + \Delta P / (n - 1)$

## IPn的推导

线性增益区间线性方程： $Y = X + G$ ；在非线性区间，IPn线性方程： $Y = nX + b$

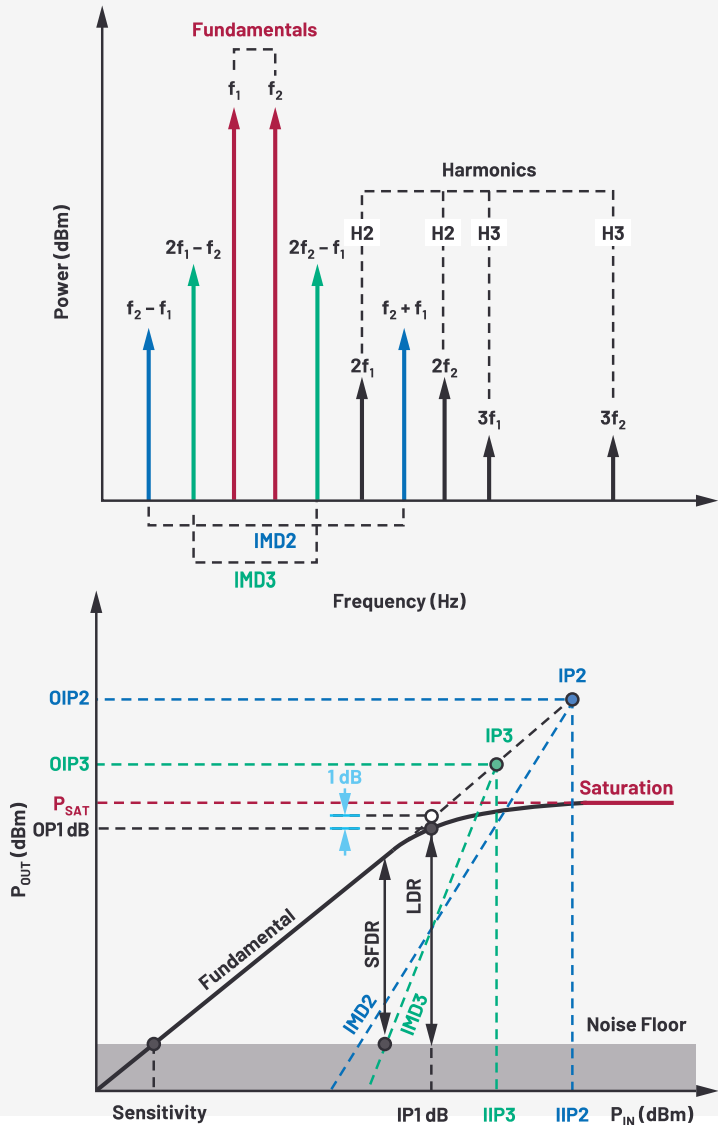
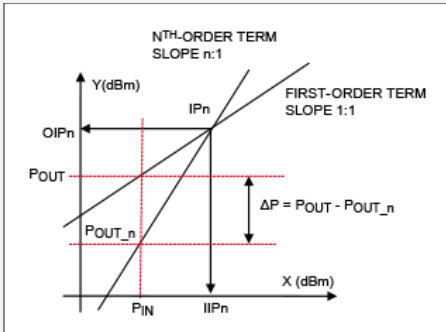
(1) 求解IPn线性方程

IPn线性方程经过测试点  $(Pin, Pout - \Delta P)$ ，即  $(Pin, Pin + G - \Delta P)$ ，在非线性区间，IPn线性方程： $Y = nX + (1 - n)Pin + G - \Delta P$

(2) 求解IIPn, OIPn

求解 $Y = X + G$ 和 $Y = nX + (1 - n)Pin + G - \Delta P$ 的交点： $(PIN + \Delta P / (n - 1), PIN + \Delta P / (n - 1) + G)$

即： $IIPn = PIN + \Delta P / (n - 1)$ ,  $OIPn = PIN + G + \Delta P / (n - 1)$



# 非线性

- IP3

**Questiona:** IM3曲线: 斜率为3倍线性增益, 为什么斜率是3?

**Answer1:** 非线性系统, n次谐波

非线性系统:  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 + a_7x^7 + \dots$

输入:  $X(t) = A \cos(\omega t + \varphi) = \frac{A}{2}(e^{j(\omega t + \varphi)} + e^{-j(\omega t + \varphi)})$  (欧拉公式)

简化输入, 令  $\varphi = 0$ :  $X(t) = A \cos \omega t = A \frac{(e^{j\omega t} + e^{-j\omega t})}{2}$

✓  $y = a_0$ 的输出:  $Y(t) = a_0$

✓  $y = a_1x$ 的输出:  $Y(t) = a_1A \cos \omega t$

✓  $y = a_2x^2$ 的输出:  $Y(t) = a_2A^2(\cos \omega t)^2 = \frac{a_2A^2}{2} \cos 2\omega t + \frac{a_2A^2}{2}$

✓  $y = a_3x^3$ 的输出:  $Y(t) = a_3A^3(\cos \omega t)^3 = a_3A^3 \frac{(e^{j\omega t} + e^{-j\omega t})^3}{8} = a_3A^3 \frac{\cos 3\omega t + 3 \cos \omega t}{4} = \frac{a_3A^3}{4} \cos 3\omega t + \frac{3a_3A^3}{4} \cos \omega t$

✓  $y = a_4x^4$ 的输出:  $Y(t) = a_4A^4(\cos \omega t)^4 = a_4A^4 \frac{(e^{j\omega t} + e^{-j\omega t})^4}{16} = a_4A^4 \frac{\cos 4\omega t + 4 \cos 2\omega t + 3}{8} = \frac{a_4A^4}{8} \cos 4\omega t + \frac{a_4A^4}{2} \cos 2\omega t + \frac{3a_4A^4}{8}$

✓  $y = a_5x^5$ 的输出:  $Y(t) = a_5A^5(\cos \omega t)^5 = a_5A^5 \frac{(e^{j\omega t} + e^{-j\omega t})^5}{32} = a_5A^5 \frac{2 \cos 5\omega t + 5 \cos 3\omega t + 10 \cos \omega t}{32} = \frac{a_5A^5}{16} \cos 5\omega t + \frac{5a_5A^5}{32} \cos 3\omega t + \frac{5a_5A^5}{16} \cos \omega t$

综上:

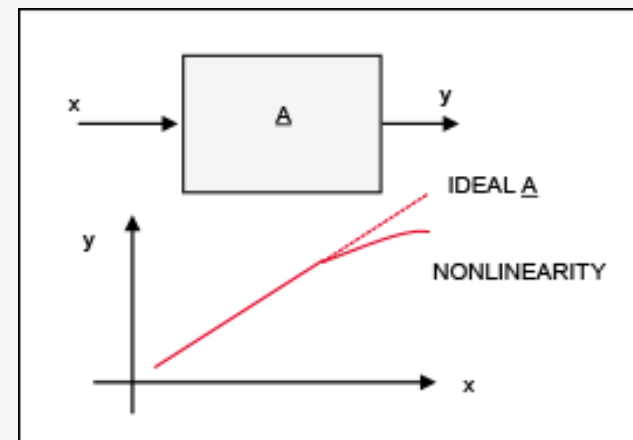
$y = a_0 + a_1x$ 的输出:  $Y(t) = a_1A \cos \omega t + a_0$

$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$ 的输出:  $Y(t) = \frac{a_3A^3}{4} \cos 3\omega t + \frac{a_2A^2}{2} \cos 2\omega t \left( a_1A + \frac{3a_3A^3}{4} \right) \cos \omega t + \frac{a_2A^2}{2} + a_0$

参考文献:

[1] ADI MT-053 Op Amp Distortion HD, THD, THD + N, IMD, SFDR, MTPR.pdf

[2] Maxim IP3\_and\_Intermodulation\_Guide.pdf



# 非线性

## Answer 2: 非线性系统, 输入信号频率w1, w2, n阶互调

非线性系统:  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 + a_7x^7 + \dots$

输入:  $X_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) = \frac{A_1}{2}(e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)} + e^{-j(\omega_1 t + \varphi_1)})$ ,  $X_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) = \frac{A_2}{2}(e^{j(\omega_2 t + \varphi_2)} + e^{-j(\omega_2 t + \varphi_2)})$

简化输入, 令  $\varphi_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = 0$ :  $X_1(t) = A_1 \cos \omega_1 t = \frac{A_1}{2}(e^{j\omega_1 t} + e^{-j\omega_1 t})$ ,  $X_2(t) = A_2 \cos \omega_2 t = \frac{A_2}{2}(e^{j\omega_2 t} + e^{-j\omega_2 t})$

✓  $y = a_0$ 的输出:  $Y(t) = a_0$

✓  $y = a_1x$ 的输出:  $Y(t) = a_1(A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t)$

✓  $y = a_2x^2$ 的输出:  $Y(t) = a_2(A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t)^2 = a_2 \left[ \frac{A_1^2}{2} \cos 2\omega_1 t + \frac{A_2^2}{2} \cos 2\omega_2 t + A_1 A_2 \cos(\omega_1 + \omega_2)t + A_1 A_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \frac{A_1^2}{2} + \frac{A_2^2}{2} \right]$

✓  $y = a_3x^3$ 的输出:  $Y(t) = a_3(A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t)^3 =$

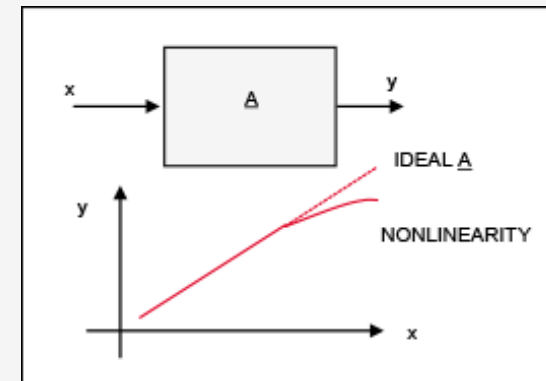
$$= a_3 \left\{ \frac{A_1^3}{4} \cos 3\omega_1 t + \frac{A_2^3}{4} \cos 3\omega_2 t + \left( \frac{3A_1^3}{4} + \frac{3A_1 A_2^2}{2} \right) \cos \omega_1 t + \left( \frac{3A_2^3}{4} + \frac{3A_1^2 A_2}{2} \right) \cos \omega_2 t + \frac{3A_1^2 A_2}{4} [\cos(2\omega_1 + \omega_2)t + \cos(2\omega_1 - \omega_2)t] + \frac{3A_1 A_2^2}{4} [\cos(\omega_1 + 2\omega_2)t + \cos(\omega_1 - 2\omega_2)t] \right\}$$

综上:

$y = a_0 + a_1x$ 的输出:  $Y(t) = a_1 A_1 \cos \omega_1 t + a_1 A_2 \cos \omega_2 t + a_0$

$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$ 的输出:  $Y(t) = a_3 \frac{A_1^3}{4} \cos 3\omega_1 t + a_3 \frac{A_2^3}{4} \cos 3\omega_2 t + a_2 \frac{A_1^2}{2} \cos 2\omega_1 t + a_2 \frac{A_2^2}{2} \cos 2\omega_2 t + \left( a_1 A_1 + a_3 \frac{3A_1^3}{4} + a_3 \frac{3A_1 A_2^2}{2} \right) \cos \omega_1 t + \left( a_1 A_2 + a_3 \frac{3A_2^3}{4} + a_3 \frac{3A_1^2 A_2}{2} \right) \cos \omega_2 t +$

$a_3 \frac{3A_1^2 A_2}{4} [\cos(2\omega_1 + \omega_2)t + \cos(2\omega_1 - \omega_2)t] + a_3 \frac{3A_1 A_2^2}{4} [\cos(\omega_1 + 2\omega_2)t + \cos(\omega_1 - 2\omega_2)t] + a_2 A_1 A_2 \cos(\omega_1 + \omega_2)t + a_2 A_1 A_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t + a_2 \frac{A_1^2}{2} + a_2 \frac{A_2^2}{2} + a_0$



[1] ADI MT-053 Op Amp Distortion HD, THD, THD + N, IMD, SFDR, MTPR.pdf

[2] Maxim IP3\_and\_Intermodulation\_Guide.pdf