

矢量网络分析仪的原理及应用

原创 皮诺曹 射频通信链 2025年12月14日 13:30 江苏



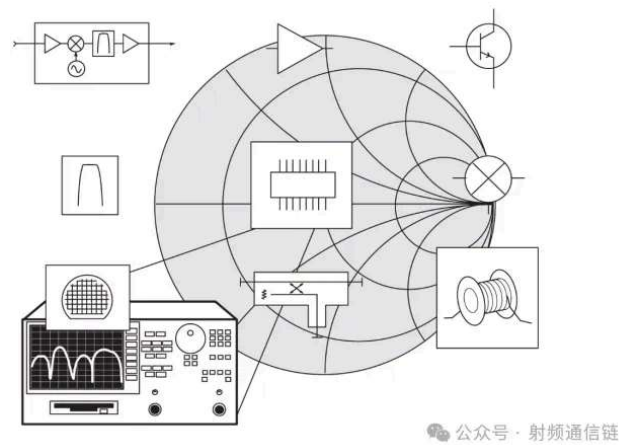
射频通信链

让射频学习不再困难，学射频，学通信，就看射频通信链。

415篇原创内容

公众号

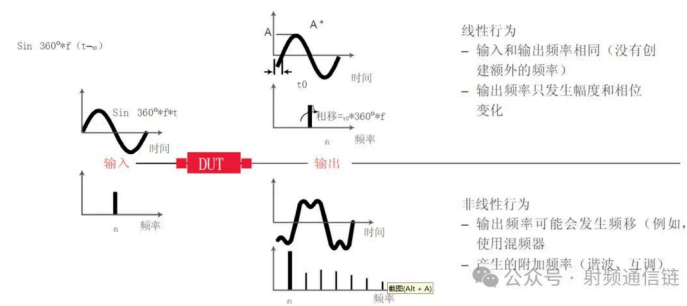
矢量网络分析是实验室常见的一种测量仪器，它既能测量单端口网络或两端口网络的各种参数幅值，又能测相位，矢量网络分析仪能用史密斯圆图显示测试数据。



网络分析仪的使用背景

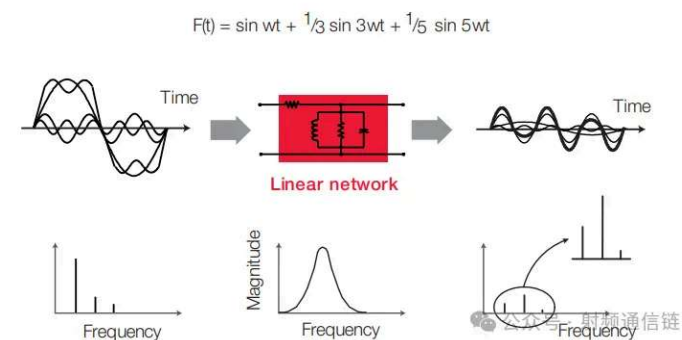
做射频的都知道，所有的通信系统必须要考虑的一个重要问题就是非线性——信号失真的影响。通常情况下，我们认为失真都是非线性效应引起的，但是线性系统也可能会引进失真。

线性系统通过改变频谱分量的幅度和相位来改变经过系统的信号波形。

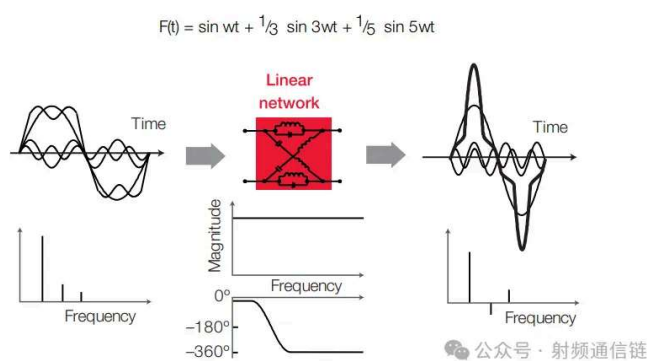


无线性失真

对于无线性失真传输，DUT的幅频响应必须是平坦的，并且相位必须是线性的。比如说方波（方波从频谱上看含有丰富的谐波）经过带通滤波器，带内对所选的频率衰减很小，同时相位是线性变化的。（下图图所示）



如果方波经过一个全通滤波器，但是该滤波只对三次谐波的相位产生非线性反转，那么即使滤波器幅频响应没有发生变化，但是输出的幅频响应变了。输出出现了失真。

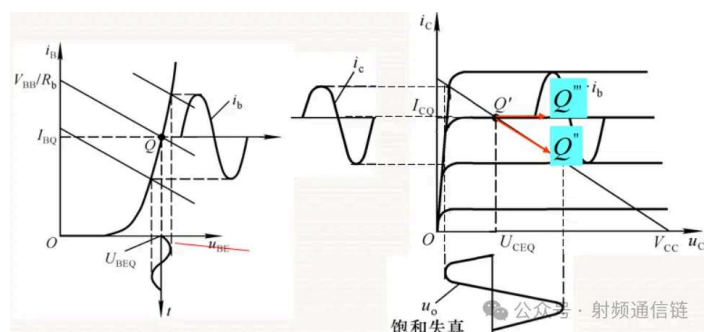


所以无线性失真传输，不仅要关注幅频响应的变化，也要关注相位的变化。

非线性器件失真

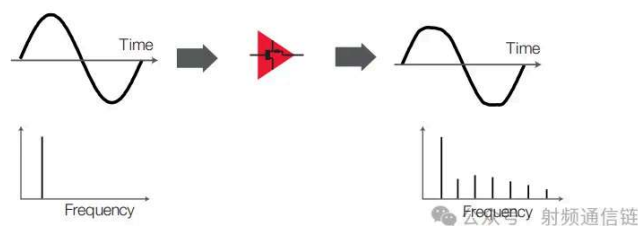
非线性器件引入失真，这个是射频工程师常见的现象——放大器。如果放大器进入饱和区，输出信号就会被销顶，输出的信号就不是正弦曲线。根据傅里叶级数展开，就会所产生谐波频率。

无源器件在高功率输入下也会表现出非线性。



Nonlinear networks

Saturation, crossover, intermodulation, and other nonlinear effects can cause signal distortion



通信系统必须要考虑的另一个重要问题是传输的效率。为了实现高效率传输，器件之间必须呈现阻抗匹配，如果阻抗失配，传输的效率就会大大降低。阻抗匹配的原则是共轭匹配，共轭匹配的前提是知道阻抗的实部和虚部，射频系统的有效传输就是器件之间的共轭匹配。

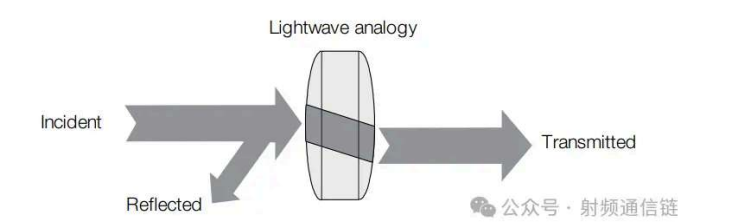
总结

在一个通信系统中，测量幅度很重要，测量相位也同样重要。无失真的线性传输系统需要同时关注幅度和相位的变化。同时为了系统的有效传出，必须要实现阻抗匹配，阻抗匹配需要测量复阻抗。

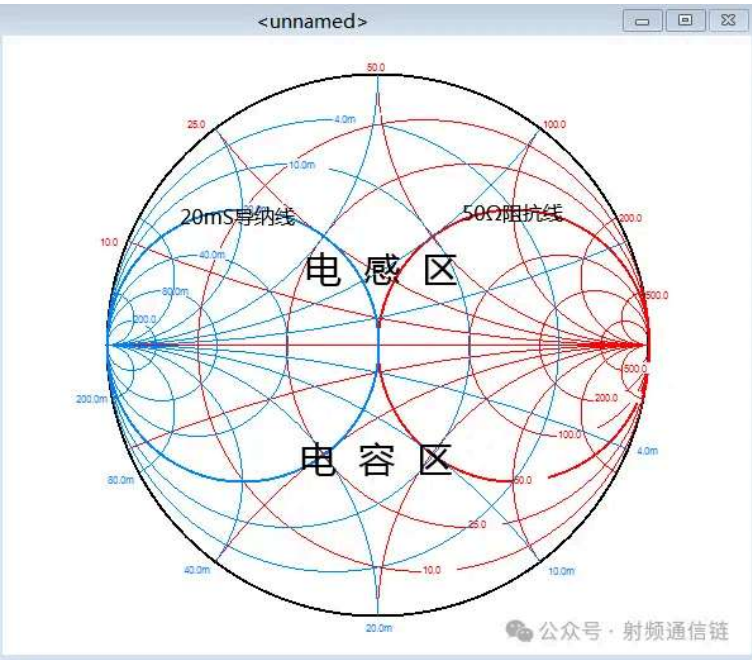
适量网络分析仪就是为了分析系统的幅度、相位、匹配的一个仪器。

矢量网络分析仪的基础

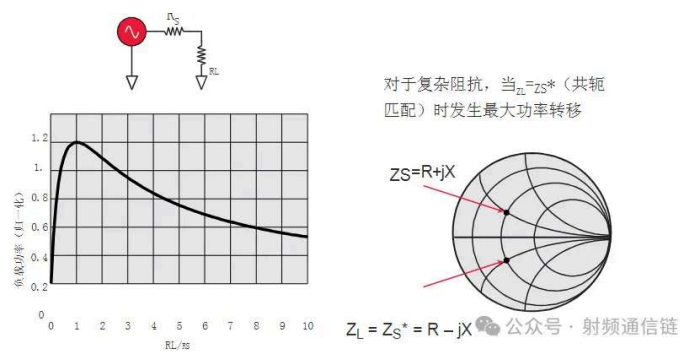
矢量网络分析仪的基础是波的反射。电磁波也是一种波，波有反射、入射和透射。矢量网络分析仪准确测量入射、反射和传输的能量。



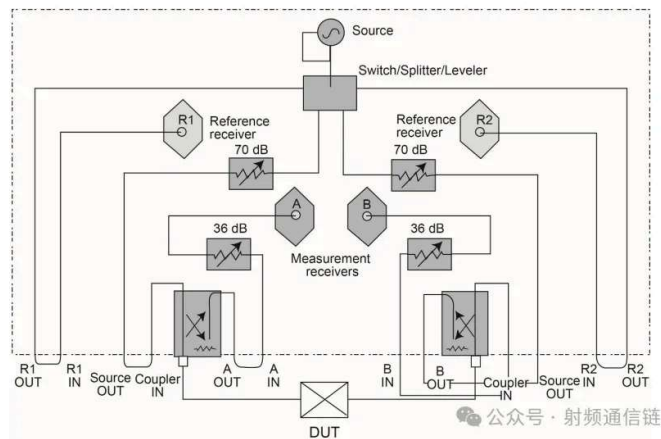
而表征波的入射、反射取决于阻抗。即射频入门基本大法，史密斯圆图。复阻抗和反射系数存在一一对应的关系，所以复阻抗可以映射到圆图上。



功率最大传输的条件，就是阻抗共轭匹配。



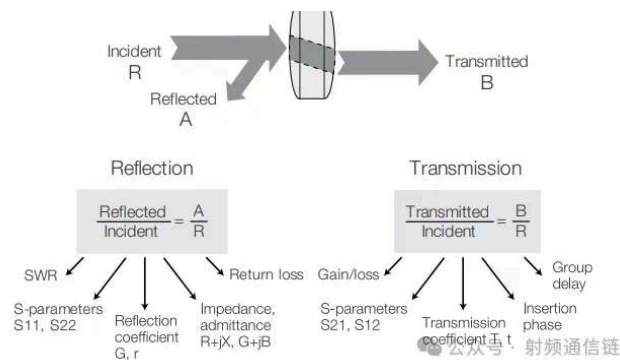
矢量网络分析仪测什么



测波的反射

矢量网络分析仪通过对参考通道R的入射波的测量。用A通道测量反射波，用B通道测量发射波。观测波中的幅度和相位的信息，可以量化被测器件的发射和传输特性。

发射和传输可以表示为矢量。



回波损耗(Return Loss): 入射功率/反射功率，为dB数值

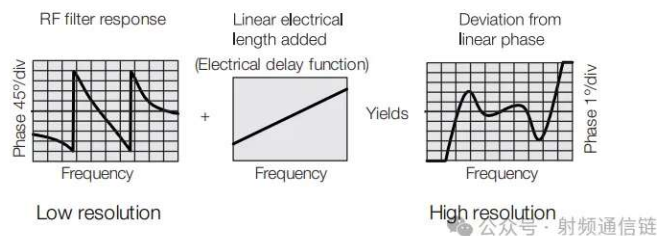
反射系数(Γ): 反射电压/入射电压，为标量

电压驻波比(Voltage Standing Wave Ration): 波腹电压/波节电压

$$VSWR = (1 + \Gamma) / (1 - \Gamma)$$

$$S11 = 20 \lg(\Gamma)$$

$$RL = -S11$$

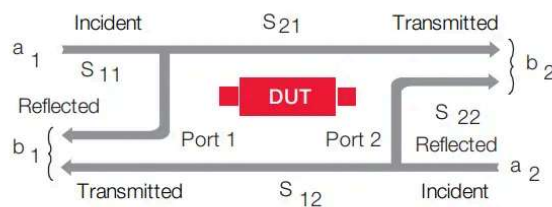


Measuring filter insertion loss



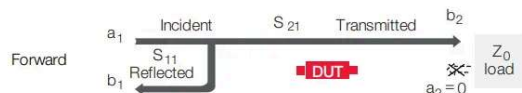
Return Loss (R.L., dB)	Reflection Coefficient (Voltage, Γ)	VSWR	Insertion Loss (I.L., dB)	Reflected Power (%)	Transmitted Power (%)
0	1.0000	∞	∞	100.00	0.00
0.5	0.9441	34.75	9.64	89.13	10.87
1	0.8913	17.39	6.87	79.43	20.57
2	0.7943	8.72	4.33	63.10	36.90
3	0.7079	5.85	3.02	50.12	49.88
4	0.6310	4.42	2.20	39.81	60.19
5	0.5623	3.57	1.65	31.62	68.38
6	0.5012	3.01	1.26	25.12	74.88
7	0.4467	2.61	0.97	19.95	80.05
8	0.3981	2.32	0.75	15.85	84.15
9	0.3548	2.10	0.58	12.59	87.41
10	0.3162	1.92	0.46	10.00	90.00
11	0.2818	1.76	0.36	7.94	92.06
12	0.2512	1.67	0.28	6.31	93.69
13	0.2239	1.56	0.22	5.01	94.99
14	0.1995	1.50	0.18	3.98	96.02
15	0.1778	1.43	0.14	3.16	96.84
16	0.1585	1.38	0.11	2.51	97.49
17	0.1413	1.33	0.09	2.00	98.00
18	0.1259	1.29	0.07	1.58	98.42
19	0.1122	1.25	0.06	1.26	98.74
20	0.1000	1.22	0.04	1.00	99.00
21	0.0891	1.20	0.03	0.79	99.21
22	0.0794	1.17	0.03	0.63	99.37
23	0.0708	1.15	0.02	0.50	99.50
24	0.0631	1.13	0.02	0.40	99.60
25	0.0562	1.12	0.01	0.32	99.68
26	0.0501	1.11	0.01	0.25	99.75
27	0.0447	1.09	0.01	0.20	99.80
28	0.0398	1.08	0.01	0.16	99.84
29	0.0355	1.07	0.01	0.13	99.87
30	0.0316	1.07	0.00	0.10	99.90

测量有源器件的传输特性



$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$



$$S_{11} = \frac{\text{Reflected}}{\text{Incident}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

$$S_{21} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

$$S_{22} = \frac{\text{Reflected}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

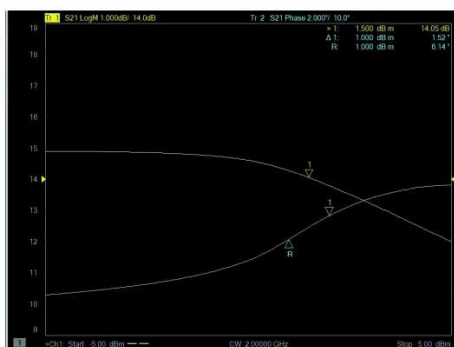
$$S_{12} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$





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

公众号·射频通信链



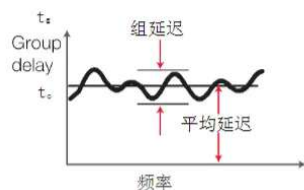
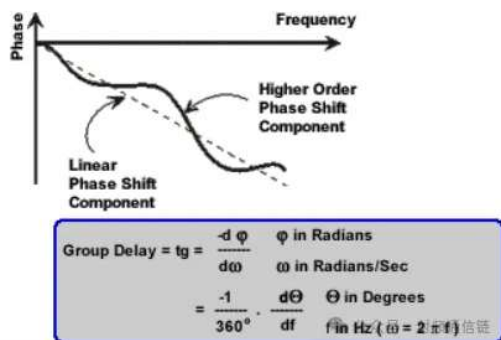
- Use transmission setup with a power sweep
- Display phase of S_{21}
- $S_{21AM} - PM = 1.52 \text{ deg/dB}$ at 1.5 dBm input power

公众号·射频通信链

测量群时延

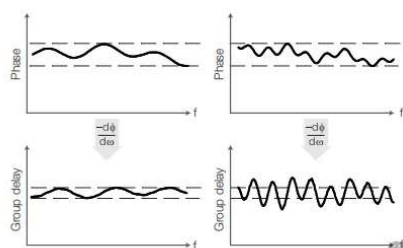
相位失真可以用另一个数据来表示——群时延。群时延表示的是信号通过系统的某频率处的相位（相移）对于频率的变化率。带信号经过媒质传输路径或设备中的线性元件时，其各个频谱分量的相速不同，无器件对各频谱分量的响应也不一样，这都会引起到达接收端的信号因各频率分量的相移或时延不同而产生相位关系的紊乱，即相位失真。

群时延可以通过相位响应和频率的微分来计算。



Deviation from constant group delay indicates distortion

公众号·射频通信链



公众号·射频通信链

最后的话

射频的学习不再是孤立的器件调试，而是从整体的角度去理解系统，理解器件，理解指标。

射频收发系统的指标设计与分解已经300+人加入了，如果你也想提升射频能力，系统的学

习射频，学习射频通信，课程介绍 [戳链接](#) ，除了课程视频，还有课件PPT，一群一起学习的人，遇到问题解决不了，需要咨询，可以和群友一起讨论，也可以咨询我。

相信能帮助你走的更快、更稳、更远！

感兴趣扫码咨询。



皮诺曹

“ 射频工程师加油 ”

喜欢作者