

射频的本质是波

原创 皮诺曹 射频通信链 2025年12月24日 11:44 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。

420篇原创内容

公众号

"射频是波" 这四个字是贯穿所有射频工程实践的"第一性原理"。先建立这个思维框架，再学《微波工程》这类经典教材，能避免陷入公式迷宫，真正做到融会贯通。

一、为什么"波的思维"是基石？

与传统电路思维的本质区别

低频电路 ($<100\text{MHz}$) 可以近似为集总参数世界：

导线就是导线，电压电流处处相等

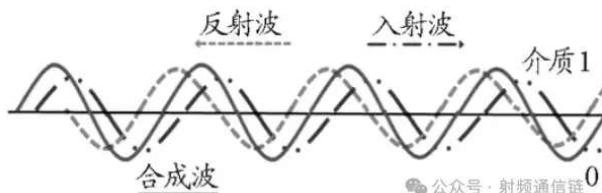
电阻、电容、电感特性稳定

时间就是时间，空间可以忽略

射频电路 ($>100\text{MHz}$) 进入分布参数世界：

导线是天线、电感、电容的混合体 (5cm的走线在400MHz约等于 $\lambda/16$ ，不可忽略)

电压电流随位置变化 (驻波比就是空间差异的度量)



时间就是空间，相位变化即路径差异 ($1\text{ns} \text{延迟} = 30\text{cm} \text{路径差} = 360^\circ @1\text{GHz}$)

不建立波的思维，你会困惑：

为什么 50Ω 匹配比功耗更重要？（防止能量反射波毁掉功放）

为什么PCB走线宽度影响性能？（微带线本身就是阻抗变换器）

为什么接地不好一切免谈？（地平面是波的参考坐标系）

二、"波的思维"的四个核心维度

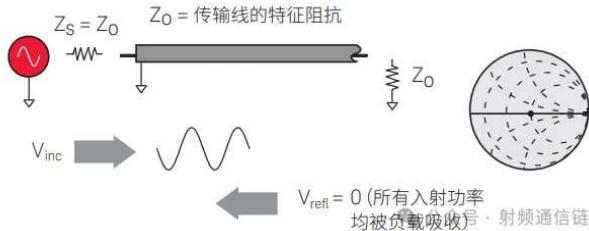
维度1：能量传输，而非电流流动

核心观念：射频关心的是电磁场能量的引导和传输，而非电子在导线中的移动。

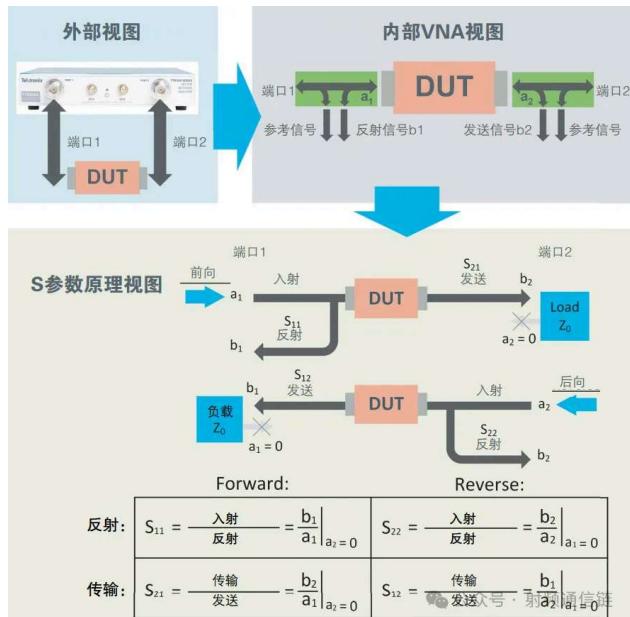
具体体现：

功率是核心指标: dBm、dBW、dBc, 而不是电压电流

阻抗匹配是能量匹配: $Z_0=50\Omega$ 是为了让波的能量完全吸收, 无反射 ($\Gamma=0$)



S参数是波的描述: S_{11} 是反射波/入射波, S_{21} 是透射波/入射波



"回波损耗RL = $-20\log_{10}|\Gamma|$ ".....

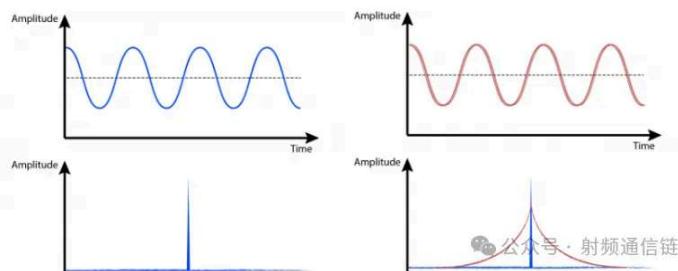
这是在量化有多少能量被反射回来了, 而不是传统意义上的"损耗"

维度2: 时间与空间的统一

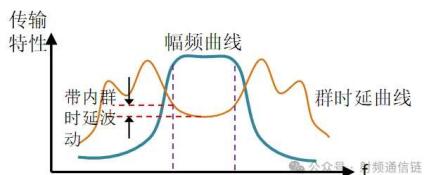
核心观念: 相位差既是时间差, 也是空间差, 两者通过光速c统一。

具体体现:

相位噪声: 瞬时频率的抖动 (时间域) = 频谱展宽 (频率域) = 波的不稳定



群时延: 不同频率的波通过器件的时间差, 导致信号失真



驻波比：入射波与反射波在空间叠加形成驻波，VSWR描述的是空间分布的不均匀性

工程实例：在TDD-LTE 1.8GHz系统中，收发转换时间要求苛刻。这本质上是要求在指定时间内（ μs 级），空间中的电磁场能量必须完成从发射到接收的切换，否则自干扰会阻塞接收机。

维度3：反射是万恶之源

核心观念：在射频世界，反射波不是信号，是干扰，会破坏线性度、稳定性。

具体体现：

驻波比>2:1时：反射功率>10%，不仅浪费能量，反射波回到功放会导致：

Return Loss (RL, dB)	Reflection Coefficient (Voltage, Γ)	VSWR	Insertion Loss (IL, 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	39.51	60.49
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	1.78	0.36	7.94	92.06
12	0.2512	1.67	0.28	6.31	93.69
13	0.2239	1.58	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

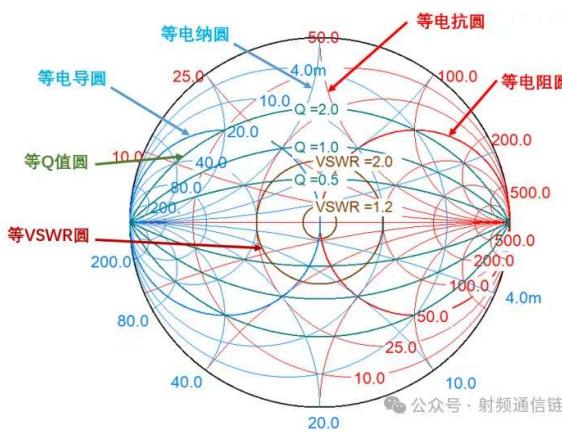
负载牵引，工作点漂移

多次反射，形成谐振

产生互调产物

阻抗失配：不仅是功率损失，更是信号完整性灾难

匹配网络本质：消除反射波，让入射波能量全部被负载吸收



维度4：带宽决定一切

核心观念：射频性能本质上是有限带宽下的最优权衡。

具体体现：

灵敏度公式： $-174\text{dBm} + 10\log_{10}(\text{BW}) + \text{NF} + \text{SNR} \dots$

带宽BW是第一决定因素，带宽越宽，进来的噪声能量越多

Q 值： $Q = f_0/BW$ ， Q 值越高， 带宽越窄， 存储能量能力越强（培训资料公式
 $Q=2\pi \cdot WS/WR$ ）

相位噪声：偏移载波1kHz、10kHz、100kHz处的噪声，不同带宽应用要求完全不同

三、有了波的思维，如何学《微波工程》？

带着问题去读，而非背诵

跳过陷阱，抓住主线

不要沉迷公式推导：电报方程的推导了解即可，关键是传播常数 $\gamma=\alpha+j\beta$ 的物理意义（衰减+相位）

不要硬背矩阵：S矩阵、ABCD矩阵，核心是它们描述的是波的关系

不要孤立看器件：滤波器、功分器、放大器，都是波的处理单元，串联起来是波的链路

射频通信链

8

四、波的思维在工程Debug中的应用

Case 1：发射功率上不去

低频思维：检查电源电压、电流、元件参数

波的思维：测 S_{11} ，发现反射过大→匹配网络失效→驻波不好→能量没传出去

Case 2：接收灵敏度差

低频思维：检查LNA增益、电源纹波

波的思维：用噪声系数仪测NF，发现第一级匹配在带内失配→噪声波被反射→进入LNA的有效信号能量减少

Case 3：杂散超标

低频思维：检查PCB布线，屏蔽罩

波的思维：用频谱仪定位杂散频率 f_{spur} ，计算 f_{spur} 与主频 f_0 的关系，发现 $f_{spur} = 2f_1 - f_2$
(三阶互调) → 功放或混频器IP3不够 → 线性区被压缩 → 产生新的波频率

Case 4：跳频图案出错（实时频谱仪应用）

波的思维：频率随时间变化，本质是波在频时二维平面上的轨迹，用RTSA捕捉跳频图案，检查切换时间是否满足TDD要求

总结：从波到工程

第一阶段：见波是波

看到频谱仪上的峰，知道那是能量；看到Smith圆图，知道那是反射。此时你建立了波的思维。

第二阶段：见波不是波

明白波是麦克斯韦方程的解，是场论的近似，是量子效应的宏观体现。你开始读《微波工程》，理解数学之美。

第三阶段：见波还是波

经过多年调试，你凭直觉就能在Smith圆图上画出匹配路径，凭经验就知道杂散来自哪个非线性阶数。此时，波的思维已内化为本能。

先建立波的思维，再去读微波工程，你会发现：教材的每一页，都在验证你对波的直觉。

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。

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

