

从系统角度看待无源互调问题

AN-S206: Application note
By ZhuHui/Application Engineer
BXT® Technologies

前言

在一个无线通信收发系统中，任何器件的驻波（匹配）都要做好，这是自无线电发明以来不变的话题。时至今日，随着技术的发展，发射系统的无源互调（PIM）重要性不但已经与驻波相提并论，某种程度上甚至超过了驻波，因为 PIM 所产生的后果是直接干扰系统接收机的正常工作，甚至导致系统瘫痪。

与驻波不同，PIM 只在多载频和大功率的条件下才需要考虑。按照笔者的一贯观点，PIM 问题应该从系统角度来看待，这样可以按照最为经济合理的方式来设计无线电收发系统。

本文以一个典型的通信收发系统为例讨论了在设计中如何合理设定和分配系统各器件和部件的 PIM 以及相关指标，以达到系统性能、成本、体积等指标的平衡。

从系统角度看待无源互调问题

图 1 是一个典型的无线通信收发系统。系统中包括功率放大器（隔离器/环流器）、合路器、双工器、天馈系统、连接器和电缆组件等。在系统设计中，通常对每个器件和部件都提出 PIM 的最高要求，这固然是一种常规思路，但是我们如果更为仔细的从系统角度来审视 PIM 问题，或许会发现更多的、更为合理的技术方案，这些都是为了达到系统电性能、成本、体积等指标的综合平衡。

让我们先来讨论图 1 系统中 PIM 的产生过程。

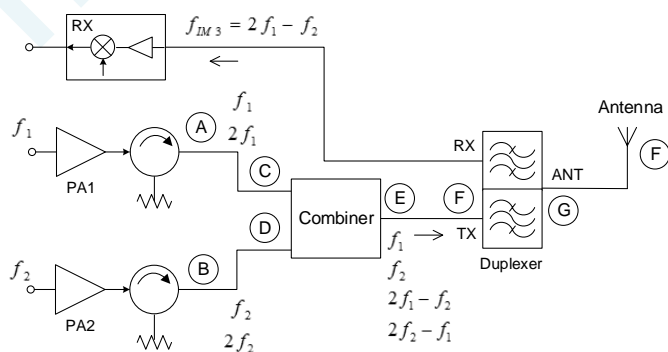


图 1. 从系统角度看待无源互调

功率放大器的输出包括了载频 $f_1(f_2)$ 以及谐波 $2f_1(2f_2)$ 、 $3f_1(3f_2)$...等，为了叙述方便起见，本文只讨论到二次谐波 $2f_1(2f_2)$ 。位于放大器后面的铁氧体隔离器的带外衰减会“滤掉”一部分 $2f_1(2f_2)$ ，但铁氧体器件自身也会产生谐波。不管怎样，A (B) 点都会包含 $f_1(f_2)$ 和 $2f_1(2f_2)$ ，在 A 到 C (B 到 D) 通路上的射频电缆组件不需要考虑其 PIM 问题，这个通路上只存在大功率单载频。

二路信号到达合路器，假设这个合路器是 $3dB$ 电桥（这种电路具有 $3dB$ 的固有损耗外加插入损耗），来自放大器 1 的输出功率到达 C 点后会有一部分串入 D 点并反向输入到放大器 2（反之亦然），此时放大器 2 会产生一个反向互调，这个互调会经过合路端口输出到下一

级电路。假设采用腔体滤波器组成的合路器（这种电路只有插入损耗），无论是不是低 PIM 设计，首先，由放大器产生的谐波大部分会被滤波器滤除，可以认为到达 E 点只剩下 f_1 和 f_2 ；但是如果 E 点的射频连接器不是低 PIM 设计的，那么在这一点将会产生 PIM，从这一点开始已经是二个大功率载频的交集点了。

信号经过电缆组件从 E 点到 F 点，这个环节会产生 PIM。

到达双工器 F 点的信号具有四个频率分量(f_1 , f_2 , $2f_2-f_1$ 和 $2f_1-f_2$)，其中二个三阶互调产物将被 TX 滤波器滤除，只有二个载频会到达双工器的天线端口 G，但双工器自身也会产生 PIM，因此最终出现在 G 点的仍然有互调产物，一部分会继续流向天线方向，这种互调被称为传输互调；还有一部分($2f_1-f_2$)会通过 RX 滤波器进入系统接收机，这种互调被称为反射互调。

G 点以后的所有器件，包括电缆组件、避雷器、驻波监测装置和天线等，都会产生 PIM，这些 PIM 产物会通过天线辐射出去（传输互调）和反射回接收机（反射互调）。

下面我们对系统中各部件和器件的 PIM 性能以及对系统的贡献进行初步讨论。

功率放大器和隔离器

放大器是有源器件，不在本文的讨论范畴内，但放大器是产生 PIM 的源头，所以我们从位于放大器输出端的隔离器/环流器开始 PIM 之旅。

只要放大器的设计带宽在隔离器可以达到的频率范围内，放大器设计者都会在其输出端加一个隔离器，几乎没有例外。隔离器采用了铁氧体材料，是唯一的一种各项异性的无源器件，这种神奇的无源器件可以让信号只向一个方向流动，从而保护放大器不会因为失配而产生故障。

因为隔离器是窄带器件，在设计通带以外有较大的插入损耗（图 2）。一些整机设计师巧妙地利用了隔离器的这种特性，将其作为“滤波器”使用，用来滤除放大器产生的谐波，这样可以减少对谐波滤波器的要求从而降低整机的空间和成本。假设将图 2 所示的隔离器用于

一个功率放大器的输出端，当载频为 935MHz 时，在其二次谐波 1870MHz 的位置，隔离器的损耗大于 24dB，也就是说，这个放大器的二次谐波被隔离器抑制了超过 24dB。

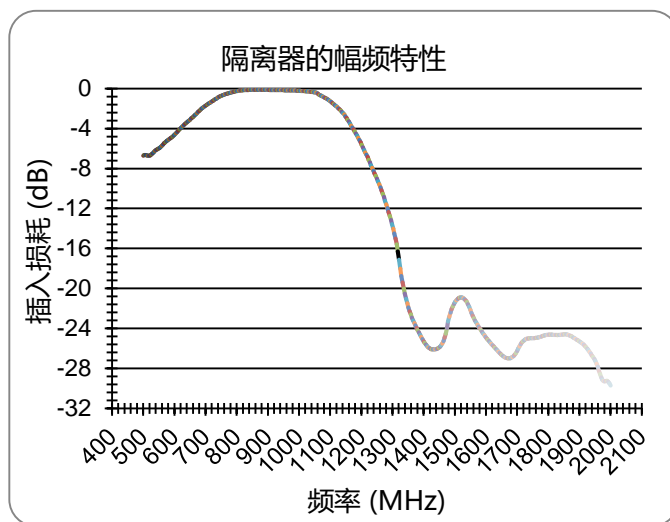


图 2. 隔离器的带外抑制特性

隔离器的一个令人头疼的问题是其非线性特性，这是由于其材料特性决定的。首先隔离器自身会产生谐波（图 3），而且有较大的量级，这些谐波产物只能交给后级滤波器来处理。

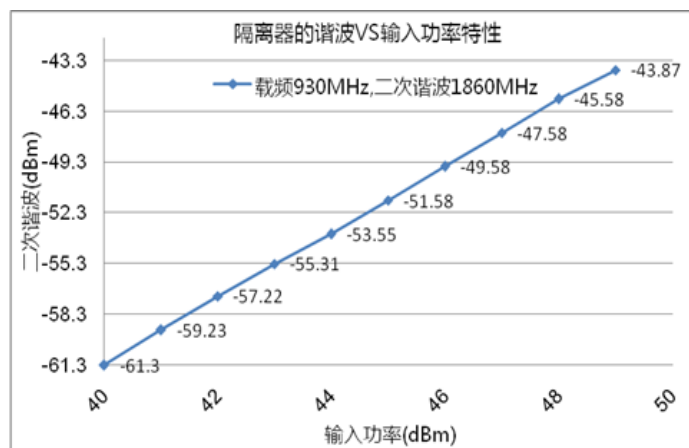


图 3. 隔离器的二次谐波特性

另一个需要特别注意的是隔离器的反向互调，在多载频合成系统中，这个反向互调尤其需要被重视。

反向互调是指当二个载频分别从输入和输出端加到隔离器时，在输出端所产生的互调产物（图 4）。注意载频来自不同的方向，而且幅度大小也不同。定义反向互调时，应选取幅度较大的互调产物，并以幅度较大的

载频为参考。当二个载频幅度分别为+45dBm 和 +35dBm 时，隔离器反向互调的典型值为-35dBm。

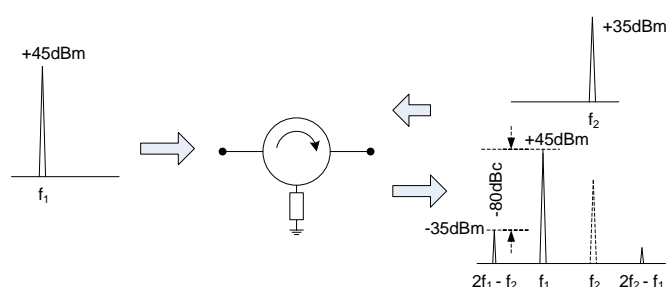


图 4. 隔离器的反向互调特性

在系统设计时，如果考虑了隔离器的这些非线性特性并对其提出要求，可以为后续滤波器的幅频特性指标的确定提供依据，在通带损耗、阻带抑制、成本和体积方面找到一个最佳平衡点。

发射合路器

从发射合路器开始，需要考虑低 PIM 设计了，因为在合路器的输出端存在多载频大功率信号，符合 PIM 的产生条件。

从系统 PIM 角度考虑，发射合路器的隔离度要尽可能做好，这样可以减少各放大器之间的互相串扰，以降低由隔离器产生的反向互调。如果频段许可，应尽可能采用由滤波器组成的腔体合路器，这种结构的电路可以做到很低的插入损耗（小于 1dB）和很高的带外抑制度和隔离度（典型值 80dB）。对于宽带测试应用，通常采用 3dB 电桥来进行功率合成，这种电路具有宽带特性，但隔离度远不如腔体合路器，由于体积并非测试系统的首要考虑目标，因此系统的 PIM 可以交给后续的滤波器来保证。

收发双工器

到了双工器，这是保证系统 PIM 指标的关键！到达 F 点的四个频率分量(f_1 , f_2 , $2f_2 - f_1$ 和 $2f_1 - f_2$)中，二个三阶互调产物将被 TX 滤波器滤除，只有二个载频会到达双工器的天线端口 G。此时我们不难发现，G 点的低 PIM 设计极为重要，如果在这一点产生 PIM，后面再也没有“把关”的器件了。因此，对于系统而言，如何强调双工器的 PIM 指标都不为过。

双工器以后的其他器件

从 G 点开始的所有器件，包括电缆组件、避雷器、驻波监测装置和天线等，都只能靠自己了，因为再也没有像双工器那样的“守护神”来抑制互调产物了。所以对这部分器件，必须有低互调设计的要求。

天线

相对于系统中的其他部件，天线的结构更加复杂，更容易产生 PIM，因此天线的 PIM 问题已经越来越被系统所重视。

电缆组件

在图 1 的系统中，电缆 PIM 指标的重要性依次为双工器到天线、合路器到双工器、放大器到合路器。

现代工艺条件下、常用的电缆和连接器都已经实现低 PIM 设计，如半柔和半刚性电缆、波纹管电缆；DIN716、N、TNC、SMA、3.5mm 型连接器等。

结束语

本文试图表明这样一个观点：从系统角度看待无源器件的 PIM 问题，就可以对系统中每个环节的无源器件的 PIM 提出合理的技术指标要求，以提高系统的设计效率和降低成本，最终达到系统指标、设计和加工难度、经济成本、体积等因素的平衡。

本文仅仅定性讨论了各种无源器件的 PIM 特性，有关器件的定量分析，以及更多的关于 PIM 的问题，欢迎业界同行和专家进一步与 BXT 沟通和讨论。