

# 基站中的无源交调(PIM)效应： 了解挑战和解决方案

作者：Frank Kearney和Steven Chen

分享



## 简介

众所周知，有源器件会在系统中产生非线性效应。人们已开发出多种技术来改善此类器件在设计和运行阶段的性能。容易忽视的是，无源器件也可能引入非线性效应；虽然有时相对较小，但若不加校正，这些非线性效应可能会严重影响系统性能。

PIM表示“无源交调”。它代表两个或更多信号通过一个具非线性特性的无源器件传输时产生的交调产物。机械连接部分的相互作用一般会引起非线性效应，这在两种不同金属的接合处尤为明显。实例包括：松动的电缆连接、不干净的连接器、性能糟糕的双工器或老化的天线等。

无源交调在蜂窝通信行业是一个重大问题，而且非常难以排解。在蜂窝通信系统中，PIM可能引起干扰，降低接收机灵敏度，甚至完全阻塞通信。这种干扰可能影响产生它的蜂窝以及附近的其他接收机。例如，在LTE频段2中，下行链路范围是1930 MHz至1990 MHz，上行链路范围是1850 MHz至1910 MHz。若有两个分别位于1940 MHz和1980 MHz的发射载波从具有PIM的基站系统发射信号，则其交调会产生一个位于1900 MHz的分量，该分量落入了接收频段，这会严重影响接收机。此外，位于2020 MHz的交调可能影响其他系统。

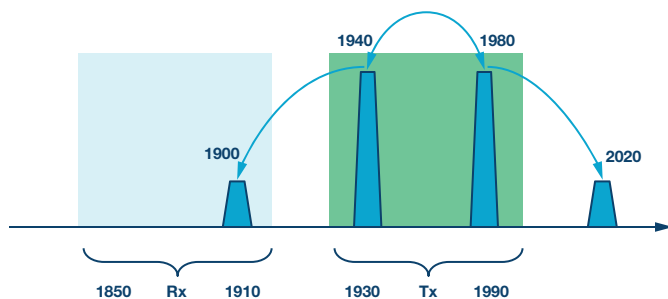


图1. 无源交调，落到接收机频段

随着频谱变得越来越拥挤，并且天线共享方案变得越来越普遍，不同载波的交调产生PIM的可能性也在增加。利用频率规划避免PIM的传统方法变得越来越不可行。除上述挑战外，CDMA/OFDM等新型数字调制方案的采用意味着通信系统的峰值功率也在提高，使PIM问题“雪上加霜”。

对服务提供商和设备供应商而言，PIM是一个突出的严重问题。检测并尽可能解决该问题，可提高系统可靠性并降低运行成本。本文尝试评述PIM的来源和原因，以及予以检测和解决的技术。

## PIM分类

初步的调查显示，PIM有三种不同类型，每类有不同的特点，需要不同的解决方案。我们选择按如下类型分类：设计引入PIM、装配PIM和锈体PIM。

### 设计引入PIM

我们知道，某些无源器件与其传输线路一起会产生无源交调。因此，当设计系统时，开发团队应根据器件制造商给出的规格，选择PIM最小或处于可接受水平的无源元件。环形器、双工器和开关特别容易产生PIM效应。设计人员若能接受较高水平的无源交调，那么可以选择成本较低、尺寸较小或性能较低的器件。

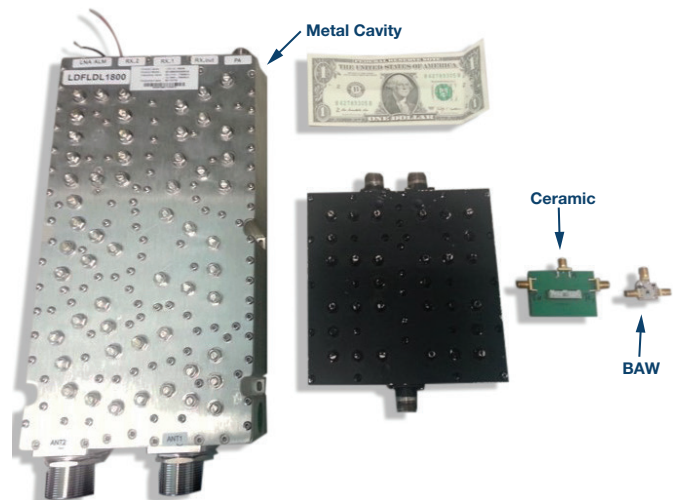


图2. 器件设计权衡：尺寸、功耗、抑制和PIM性能

如果设计人员真的选择性能较低的器件，则相应的较高水平交调可能会落回到接收机频段内，导致接收机降敏。必须注意：在这种情况下，不良频谱辐射或功率效率损失可能不如PIM导致接收机降敏那样令人关注。在小型蜂窝无线电设计中，此问题尤其重要。ADI公司目前正在研发可从接收信号中检测、模拟、消除（抵消）双工器等静态无源元件PIM的技术（参见图3）。

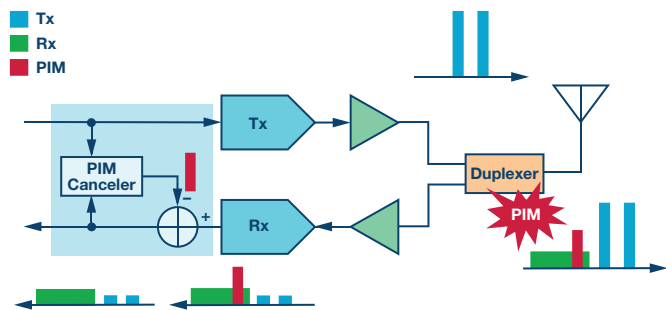


图3. PIM的产生以及PIM抵消算法

该算法之所以有效，是因为它知晓载波信息，并且可以使用接收机相关性来确定交调伪像，然后从收到的信号中消除。

当不再能利用相关性确定交调伪像时，该算法的局限性便开始浮现。图4显示了一个实例。在该例中，两个不同的发射机共享一根天线。如果假设每条路径的基带处理是彼此独立的，那么算法便不太可能知晓二者信息，故而它能在接收机执行的相关性和抵消处理会受限。

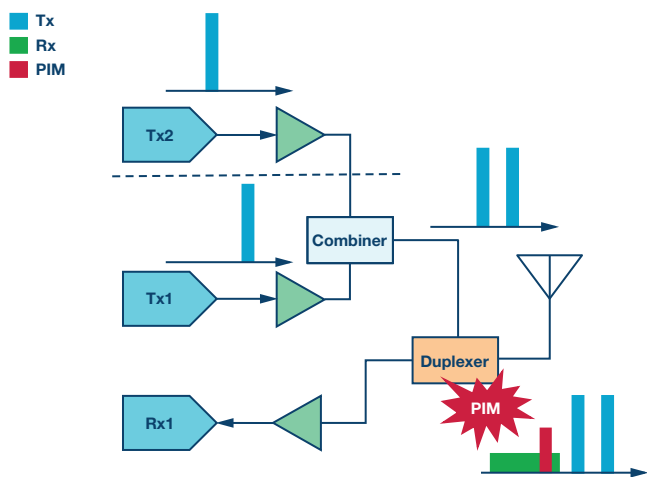


图4. 多源共享一根天线

### 加之于PIM挑战的复杂性

站点访问和成本给服务提供商带来了挑战，我们发现越来越多这样的事例：不同发射机共享单根宽带天线。其架构可以是各种频段和格式的混合： $T_{DD} + F_{DD}$ ； $T_{DD}$ ：F + A + D， $F_{DD}$ ：B3，等等。图5显示了这种配置的概貌。在这个例子中，客户试图实现一个复杂但现实的配置。一个分支是 $T_{DD}$ 双频，另一分支是 $F_{DD}$ 单频，采用一个双工器。信号汇合起来，共享单根天线。Tx1和Tx2信号之间的无源交调发生在来自合并器的路径中、到天线的传输线路中以及天线本身中。所得的交调伪像落回到 $F_{DD}$ 接收机频段Rx2。

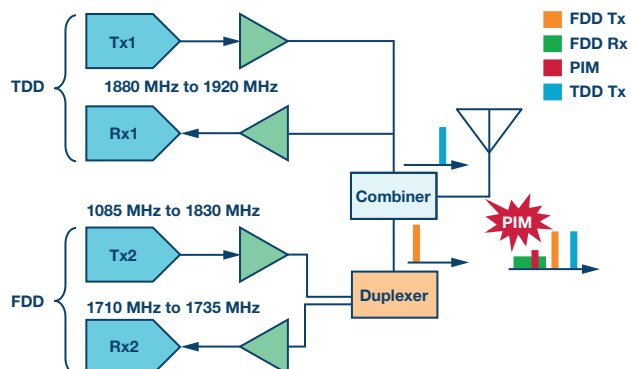


图5.  $F_{DD}/T_{DD}$ 单根天线实现方案

图6所示为对一个双频系统的实际分析。注意在这个例子中，我们需要考虑三阶以上的无源调制伪像。这种情况下，重点关注从一个频段（内部）落回到另一个接收机频段内的交调伪像。

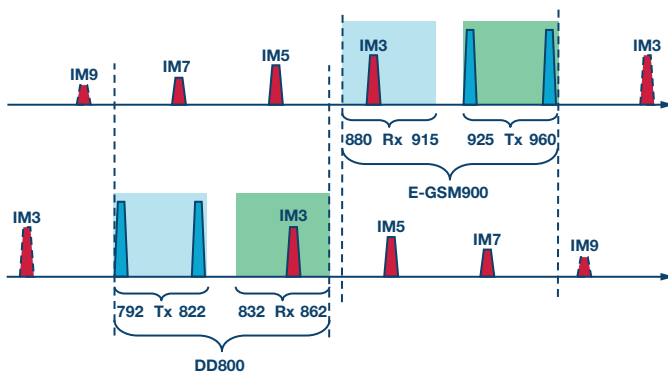


图6. 多频PIM问题

### 装配PIM

我们把第二类PIM称为装配PIM。虽然系统在安装后可以令人满意地运作，但经过一段时间后，由于天气或初次安装质量糟糕，其性能常常会下降。发生这种情况时，信号路径中的无源元件（连接器、电缆、电缆组件、波导组件和元器件等）通常会开始表现出非线性行为。事实上，某些主要的PIM现象就是由连接器、连接甚至天线本身的馈线引起的。所产生的影响可能与上面讨论的设计引入PIM相似，因此可以使用同样的PIM测量理论，该理论专门用于寻找无源交调产物的存在。

引起装配PIM的典型因素有：

- ▶ 连接器适配接口（通常是N型或DIN7/16）
- ▶ 电缆附件（电缆/连接器接合的机械稳定性）
- ▶ 材料（建议使用黄铜和铜，铁磁材料有非线性特性）
- ▶ 清洁度（尘土污染或水汽）
- ▶ 电缆因素（电缆的质量和鲁棒性）
- ▶ 机械鲁棒性（风和振动引起挠曲）
- ▶ 电热感应PIM（原因是非恒定包络的RF信号消耗的功率随时间而变化，引起温度改变，进而导致电导率发生变化）。

温度变化大、空气带有盐分/受污染或存在过大振动的环境往往会加重PIM问题。虽然可以使用与针对设计引入PIM相同的PIM测量技术，但可以认为，装配PIM的存在表明系统的性能和可靠性均有所降低。若不加以解决，引起PIM的缺陷因素可能会变本加厉，直至整个传输路径发生故障。对装配PIM采用PIM抵消方法更像是掩盖问题而非解决问题。

可以想见，此类情况下，用户可能并不希望抵消PIM，而是希望得知PIM的存在，以便消除根本原因。为此，首先需要确定PIM是从系统何处引入的，然后修理或更换特定元件。

我们可以认为设计引入PIM是可量化且稳定的，但上面所述的装配PIM是不稳定的。它可能存在于一组范围非常窄的条件下，其幅度变化可能超过100 dB。单次离线扫描可能无法捕捉到此类事例；理想情况下，传输线路诊断需要与PIM事件协同进行。

天线之外的PIM (锈体PIM)

PIM并不局限于有线传输路径，也可能发生在天线之外。该效应也被称为“锈体PIM”。这种情况下，无源交调发生在信号离开发射机天线之后，所产生的交调反射回接收机中。“锈体”这一说法来源于这样一个事实：很多情况下，交调源可能是生锈的金属物件，例如铁丝网、仓库或排水管道。

金属物件会引起反射。但在这些情况下，金属物件不仅会反射收到的信号，而且会产生并辐射交调伪像。交调的发生同在有线信号路径中一样，即发生在两种不同金属或异质材料的接合处。电磁波产生的表面电流会混合并再辐射（参见图7）。再辐射信号的幅度一般非常低。然而，如果辐射物件（生锈铁丝网、仓库或下水管等）靠近基站接收机，而且交调产物落在接收机频段内，将造成接收机降敏。

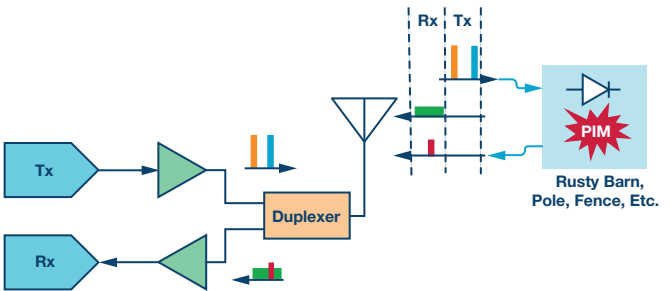


图7. 天线之外或锈体PIM

某些情况下，PIM源可通过天线定位来检测：一边改变天线位置，一边监测PIM水平。此外，也可以利用时间延迟估计来定位PIM源。如果PIM水平稳定，则可以利用标准算法抵消技术来补偿PIM。但更多情况下，PIM贡献受到振动、风和机械运动的影响，使得抵消非常难以进行。

PIM检测：定位PIM源

线路扫描

可以实施多种线路扫描技术。线路扫描测量传输系统在目标频段上的信号损耗和反射。我们不能认为线路扫描总是会精确指示PIM的可能原因。线路扫描更像是一种诊断工具，可帮助识别传输线路上的问题。早期装配问题可能表现为PIM；若不加以解决，这些装配问题可能会升级，引起更为严重的传输线路故障。线路扫描通常分为两个基本测试：回波损耗和插入损耗。二者均与频率有很大关系，且在指定频段内均可能变化很大。回波损耗衡量天线系统的功率传输效率。务必使反射回到发射机的功率最小。任何反射功率都可能使发射信号失真；若反射回的功率足够大，甚至会损坏发射机。20 dB的回波损耗值表示1%的发射信号被反射回发射机，99%到达天线——通常认为这是相当好的性能。10 dB的回波损耗表示10%的信号被反射，表明性能不理想。如果回波损耗测量值为0 dB，则100%的功率被反射，这很可能是开路或短路导致的。

时域反射

可以利用高级TDR技术来提供一个最优系统的参考映射，以及确定传输路径上开始发生损耗的确切位置。通过这种技术，操作员可以定位PIM源，从而有针对性地、高效率地予以修复。传输线路映射还能提醒操作员注意一些早期故障迹象，防止其严重影响性能。时域发射法(TDR)测量信号经过传输线路所产生的反射。TDR仪器让一个脉冲通过介质，然后将未知传输环境产生的反射与标准阻抗产生的反射进行比较。图8显示了一个简化TDR测量设置框图。

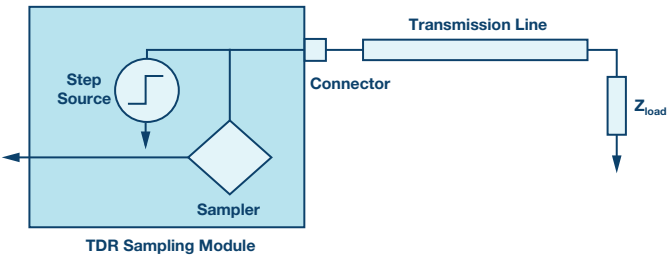


图8. TDR设置框图

图9显示了一个TDR传输线路映射实例。

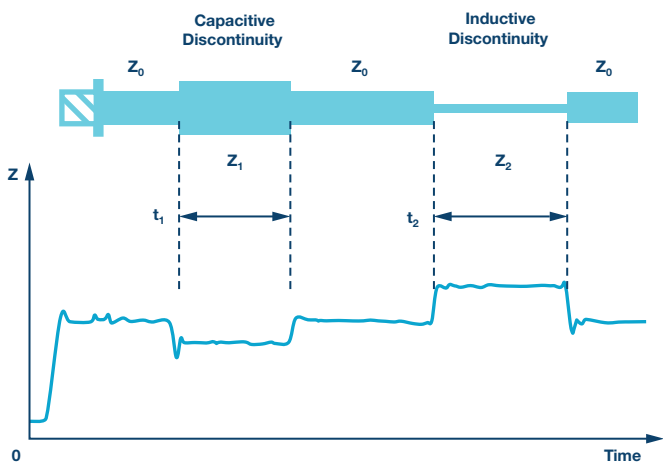


图9. TDR传输线路映射

频域反射

虽然TDR和FDR的工作原理均是沿着传输线路发送激励信号并分析反射，但这两种技术的实现方法非常不同。FDR技术采用RF信号扫描，而不是TDR所用的直流脉冲。另外，FDR要比TDR灵敏得多，能以更高的精度定位系统性能故障或降低的地方。频域反射法原理涉及源信号和反射信号（来自传输线路中的故障和其他反射特性）的矢量相加。TDR采用非常短的直流脉冲作为激励信号，其本身就能覆盖非常宽的带宽，而FDR扫描RF信号实际上是在特定目标频率（通常在系统的预期工作范围内）运行。

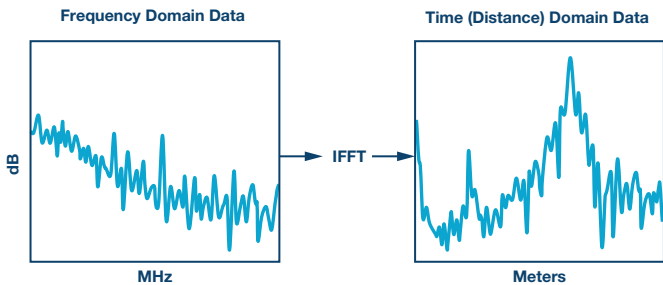


图10. FDR原理，扫描频率回波损耗与距离的关系

PIM定位

必须注意，虽然线路扫描可以指示阻抗不匹配，从而指示传输线路PIM源，但PIM和传输线路阻抗不匹配可以是互斥的。PIM非线性可能出现在线路扫描结果未指示任何传输线路问题的地方。因此，若要给用户提供一种解决方案，要求不仅能指示PIM存在，而且能准确识别传输线路上何处发生该问题，就需要采用更复杂的实施方案。

综合PIM线路测试的工作模式与针对设计引入PIM抵消所述的模式相似，不同之处是算法检查交调产物时间延迟估计的情况不同。应当注意，这些情况中的优先事项并非PIM伪像的抵消，而是定位传输线路上何处发生交调。该概念也被称为“PIM定位”（DTP）。例如，在一个双音测试中，

信号音1:

$$e^{j(w_1(t+t_0)+\theta_1)}$$

信号音2:

$$e^{j(w_2(t+t_0)+\theta_2)}$$

w<sub>1</sub>和w<sub>2</sub>为频率；θ<sub>1</sub>和θ<sub>2</sub>为初始相位；t<sub>0</sub>为初始时间。

IMD（例如低端）将为：

$$e^{j((2w_1-w_2)(t+t_0)+(2\theta_1-\theta_2))}$$

很多现有解决方案要求用户中断传输路径，插入一个PIM标准装置（它能产生固定量的PIM，用来校准测试设备）。使用PIM标准装置可为用户提供一个基准IMD，它在传输路径的特定位置/距离处并具有已知相位。图11(a)显示了概况。IMD相位θ<sub>32</sub>（如图11所示）用作基准位置0。

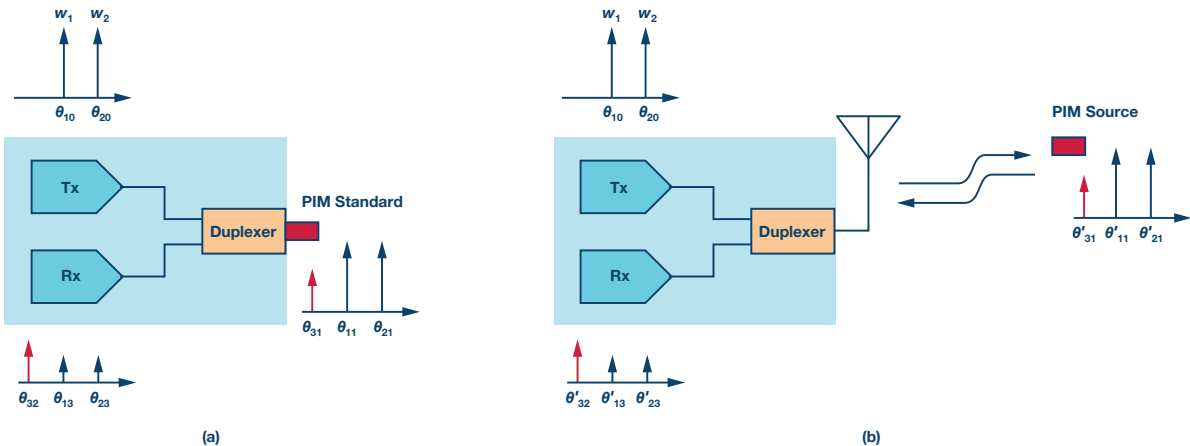


图11. PIM定位



一旦完成初始校准，便重构系统并测量系统PIM，如图11(b)所示。 $\theta_{32}$ 和 $\theta'_{32}$ 之间的相位差可用来计算到PIM的距离。

$$\frac{(2w_1 - w_2) \times (2D)}{S} = \theta'_{32} - \theta_{32}$$

其中，D为到PIM的距离，S为波传播速度（取决于传输介质）。

装配和锈体PIM可能是一个慢速递增的过程；完成安装后初期，基站可以高效率工作，但经过一段时间后，此类PIM现象可能会开始变得突出。振动或风等环境因素可能会影响PIM水平，故PIM的性质和特点是动态起伏不定的。掩盖或抵消PIM不仅可能很困难，而且可能被认为掩盖了更为严重的问题，若不加以解决，可能引发整体系统故障。这种情况下，运营商会希望避免系统整体停机的相关成本，快速定位引起PIM的器件并予以更换。

PIM定位技术(DTP)还为基站运营商提供了这样一种可能性：跟踪系统性能随时间而降低的情况，提前发现潜在问题。有了这些信息，便可在计划维修期间更换薄弱点，避免代价巨大的系统停机和专门维修工作。

## 结语

无源失调并不是什么新鲜事。这种现象已经存在多年，为人所知也有段时间了。近年来，业界的两种不同变化又把它拉回人们的视野：

第一，高级算法现在可通过一种智能方式来检测和定位PIM，并且能酌情予以补偿。以前的无线电设计人员必须选择能够满足特定PIM性能要求的器件，但在PIM抵消算法的帮助下，他们现在有了更大的选择自由。他们能够选择企及更高的性能，或者用成本较低且尺寸较小的器件实现相同的性能水平。抵消算法通过数字化方式辅助硬件元件。

第二，随着基站塔的密度和多样性爆炸式增长，我们面临着特殊系统设置（例如天线共享）带来的全新挑战。算法抵消取决于对主要传输信号的了解。在塔上空间宝贵的情况下，不同发射机可能共享单根天线，导致出现不良PIM效应的可能性大大增加。这种情况下，算法可能知道发射机路径某些部分的信息，并且可以有效工作。而在发射路径某些部分信息未知的情况下，第一代高级PIM抵消算法的性能或实现可能会受限。

随着基站设备领域的挑战难度不断加大，PIM检测和抵消算法在短期内预计能给无线电设计人员带来相当大的好处和优势，但要求开发工作跟上未来挑战的步伐。

Frank Kearney [frank.kearney@analog.com]担任ADI公司利默里克通信系统工程团队的算法开发经理。他自1988年毕业后即在ADI公司工作。他不久前从中国返回；在中国工作期间，他担任亚太地区系统工程团队的高级应用经理。他目前是都柏林大学博士候选人。



Frank Kearney

复数RF混频器、  
零中频架构及高级算法：  
下一代SDR收发器中的黑魔法

第51卷第1期

Steven Chen [steven.chen@analog.com]2004年毕业于南开大学（中国天津），获通信工程硕士学位。毕业后即加入ADI公司北京设计中心，担任数字设计工程师，先后在高级电视部门以及高速转换器部门工作。他目前担任通信系统工程团队的高级算法开发工程师。研究方向包括数字信号处理、通信系统和数字辅助模拟技术。

