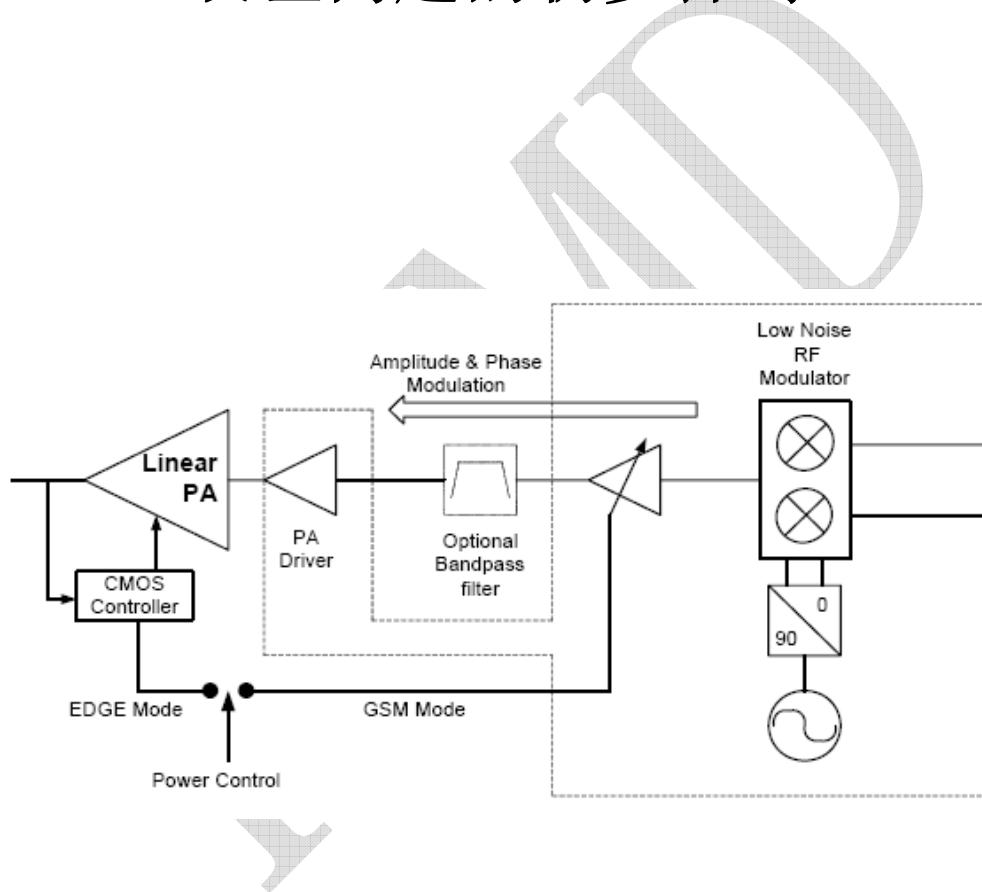


# 关于直接上变频手机平台出现相位 误差问题的初步探讨



- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改, 再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸, 多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## 目录

- 关键字
- 背景
- 相位误差基础
- 射频发射机基础
- NXP 平台发射机基础
- 相位误差故障分析和调试
  1. I/Q 信号直流分量不平衡
  2. Balun 电路
  3. 收发器 TC 和功率放大器 PA 之间的匹配滤波
  4. 功率放大器输出匹配
  5. 天线开关 ASM 控制线的退耦
  6. 发射功率通过接收回路的功率回馈
  7. 辐射测试下, 天线失配问题等等情况
  8. 和屏蔽罩 (shielding can) 相关的一些问题
  9. PA 的供电问题
  10. 26MHz oscillator 稳定性
  11. Transceiver 供电线退耦问题
- 相位误差的基本调试步骤
- 写在后面的话
- 参考文档
- 版本管理

调试电路的基础原则:

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改, 再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸, 多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## 关键字

直接上变频	direct-up conversion (DCR)
偏置锁相环发射	Offset PLL Translation Loop
相位误差	phase error (PE)
频率误差	frequency error
IQ	in-phase & quadrature phase
载波抑制	carrier rejection
动态范围	dynamic range
自动增益控制	automatic gain control
功率回馈	power feedback
飞利浦半导体	PS
NXP	PS 的手机平台现在为 NXP 公司所有
原点偏移	origin offset
射频收发器	TC
功率放大器	PA
恒定包络	constant envelope
非恒定包络	non-constant envelope
天线开关模块	Antenna Switch Module
屏蔽罩	shielding can
Balun	不平衡变压器
声表滤波器	SAW filter
模拟基带	Analog base band
TXM	Transmitter Module (PA + ASM)
PCBA	带表贴器件的印刷电路板

调试电路的基础原则:

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改, 再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸, 多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## 背景

经常会收到朋友们的反馈，他们在 Phase Error 相位误差方面碰到很大的问题。有时候连续工作两三个星期，都没有找到很好的办法。

大家比较关心的问题是：相位误差和 PA 有关系吗？为什么同样的 PCB，不同的批次，问题的现象会不一样呢？辐射测试碰到问题，该怎么办？

本文的目的是总结一下目前我所碰到的相位误差情况，试图分析产生这个问题的各种原因。

一是对过去经验的一种总结和提炼，二是希望对大家的工作有一定的借鉴意义。特别是对那些刚刚进入手机行业的射频工程师，希望能够帮忙他们迅速的成长起来。

为了方便大家阅读，本文对很多英文缩写直接使用了中文，抱歉没有一一标注出来。力求通俗，易于理解。

本文主要以 NXP 公司的手机平台为例，来分析碰到的问题和解决的办法。

我想，对于所有采用直接上变频系统的手机射频方案，都有一定的参考意义。比如 MTK 公司 MTK6139 平台。

由于笔者水平限制，有错误的地方请大家多多指教。或者您有更好的想法和建议，欢迎联系我一起讨论。

RFMD

调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## 相位误差基础

### 1. 什么是相位误差

相位误差是手机发射信号经过解调后的相位和理想相位之间的差别。一般相位误差和频率误差对我们的测量仪表来说，是同时测量得到的。详细测量方法、条件和测量计算步骤请参考 ETSI ts15101001 13.1 这一章节。

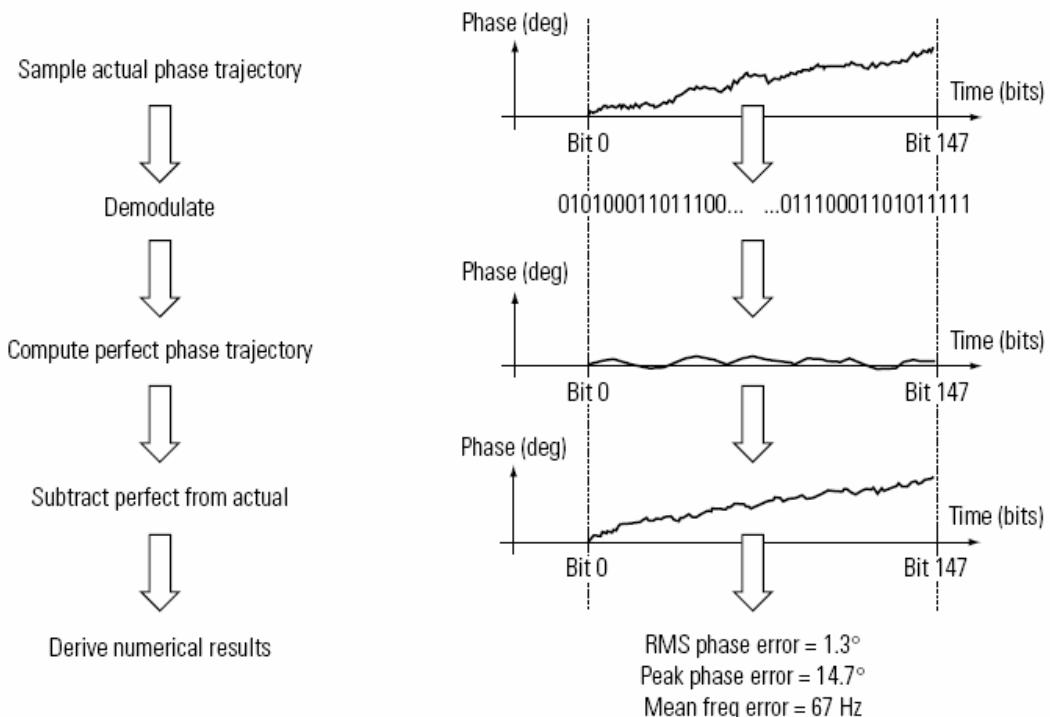
### 2. 测量的目的和理论

相位误差是一项基本的衡量GSM调制精度的指标，揭示了发射机调制器的性能。相位误差有问题，一般表明I/Q基带产生器，滤波器和发射机电路里面有问题。功率放大器的一些问题也能够导致很高的相位误差。在实际的通信系统中，不好的相位误差能够导致接收机无法正常解调。在网络信号不好的时候，这种表现更加严重，影响到了信号的覆盖范围。

这一点大家可以理解：GSM本身是一个调相系统；信号的相位上面携带着有用信息。如果相位被打乱了，接收机解调出来的信息肯定会出现问题的。

下面的图片详细讨论相位误差的理论：

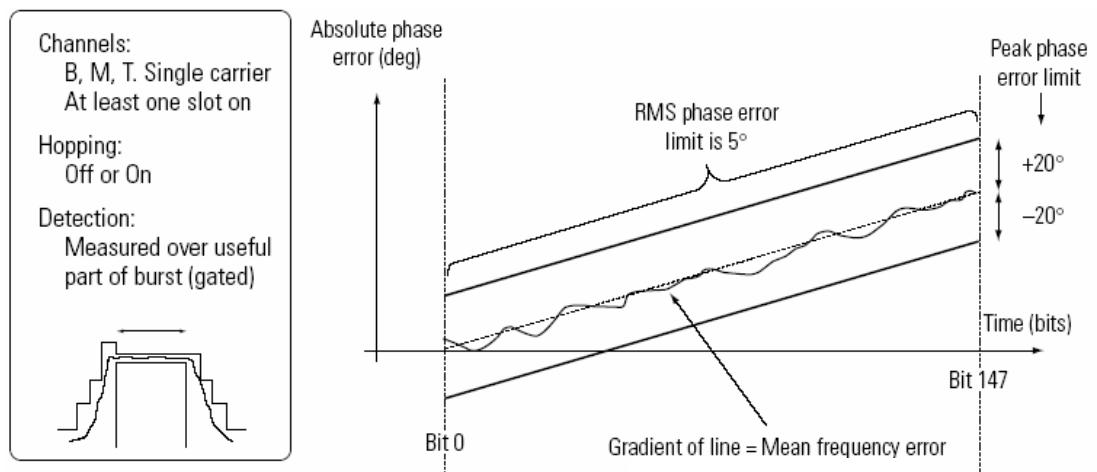
#### Theory in pictures



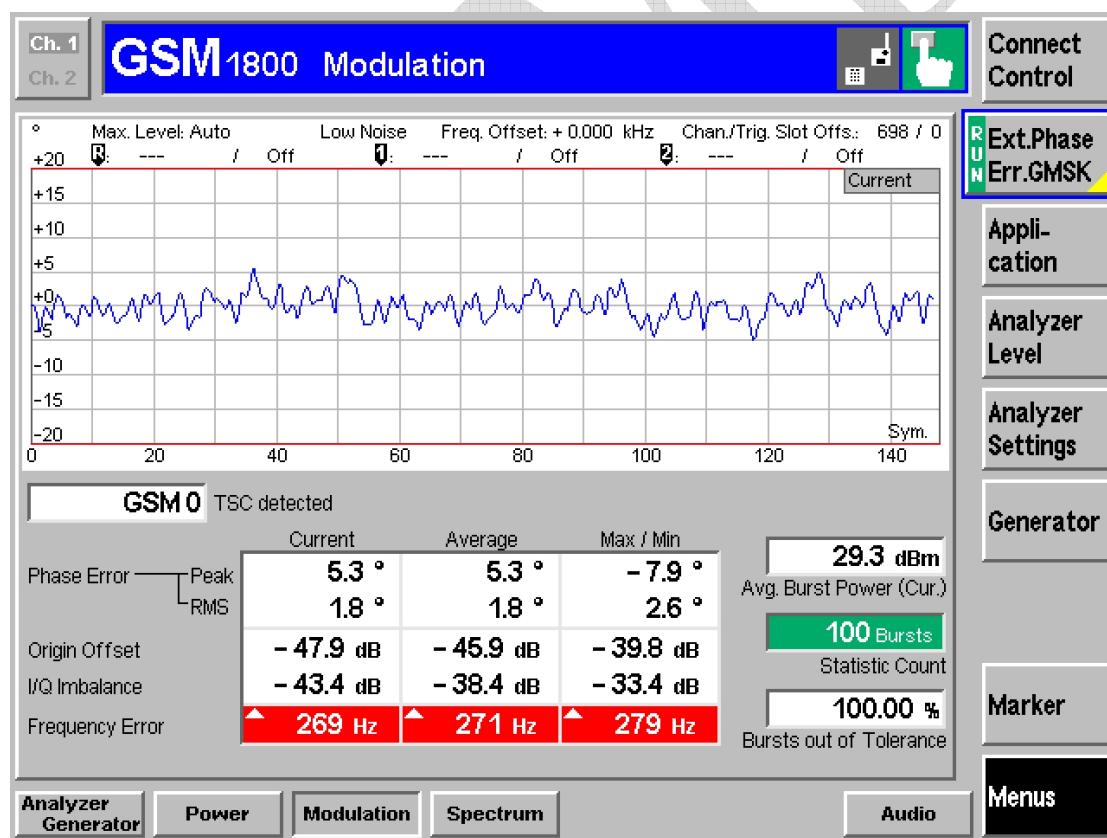
以上图片显示了仪表如何计算相位误差的。

1. 接收机对发射机的输出进行下变频后，然后开始采样。这样做的目的是为了捕捉到实际的相位轨迹。
2. 接着接收机解调和计算出理想的相位轨迹。
3. 将实际的相位轨迹和理想的相位轨迹相减，就得到了误差信号。
4. 误差信号的倾斜度就是频率误差（相位除以时间）。
5. 误差信号的波动定义为相位错误。一般的说法是均方根(RMS)和峰值。以下图片标

注出了手机的测量标准要求。详细的标准请参考ETSI TS15101001 13.1这一章节。



### 3. 实际的测量

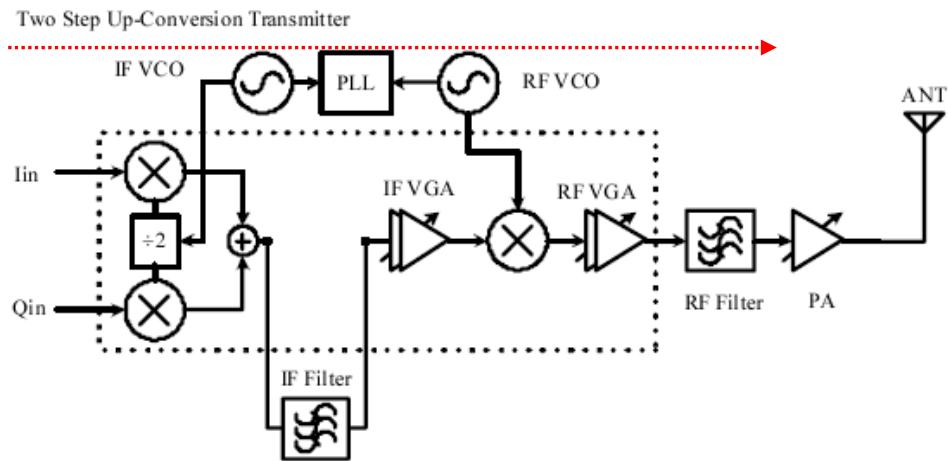


以上是从 CMU200 通信综合测试仪截取下来的图片。分别测试了频率误差 (Frequency Error)，相位误差的均方根 (RMS) 和峰值 (Peak)，原点偏置 (Origin Offset) 和 IQ 信号幅度不平衡 (I/Q Imbalance)。大家都很熟悉，不赘述了。

## 射频发射机基础

在我们进行相位误差问题探讨之前，有必要准备一些射频发射机的基础知识。在大家的脑海里建立一个基本的发射机概念。这对于我们以后解决实际问题是很有帮助的。

### 传统发射机的架构



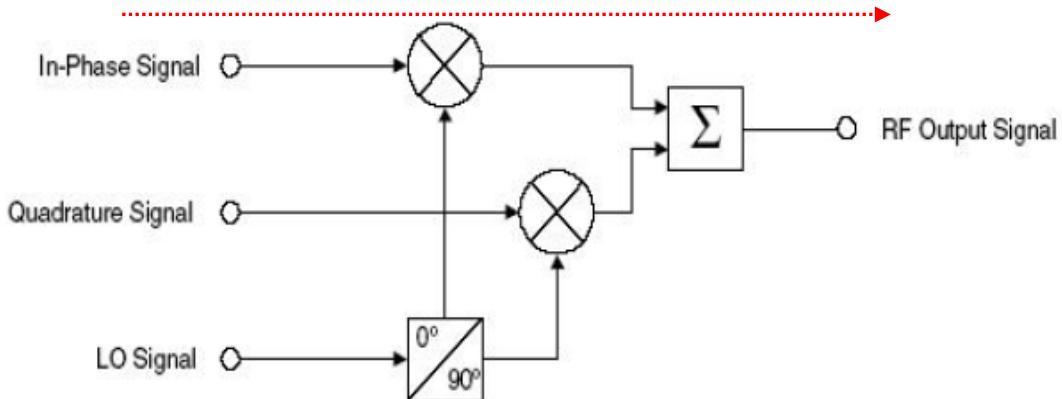
模拟基带产生的IQ信号经过射频发射机转换到射频信号，然后由天线发射出去。因此，射频发射机扮演着将基带信号转换成射频信号的角色。

射频发射机的设计必须注意下面的几点：

1. 调制精确度 (modulation accuracy)。射频发射机的调制精度决定了发射机的信号品质好坏，因此会影响到接收机解调之后的误码率。
2. 线性度。电路的非线性会让发射信号失真，进而导致接收机解调后的误码率升高。
3. 增益的动态范围。射频发射机必须有足够的动态范围，以避免接收机饱和。在3G WCDMA系统中，发射机必须有1dB的增益解析度，而且动态范围必须大于80dB。现在我们用的GSM手机中，增益解析度为2dB。动态范围是30dB左右。

传统的发射机为两次上变频发射机结构。包含变频器，通道选择滤波器，中频可编程放大器，驱动放大器和信道选择滤波器等等。

变频器的作用是将模拟基带信号转换成中频信号。如下图所示：



数学表达式如下：

$$I = G \cos(\omega t + \phi) + D$$

$$Q = \cos(\omega t + 90^\circ)$$

$$LO = \cos(\omega_c t)$$

$$RF = G \cos(\omega t + \phi) \cos(\omega_c t) + D \cos(\omega_c t) -$$

$$\cos(\omega t + 90^\circ) \sin(\omega_c t)$$

其中，G 是 IQ 振幅差异， $\Phi$  是相位误差，D 是直流误差。

如前面所述，调制器的精度决定了发射机的信号的品质好坏。当输入的基带IQ信号在相位和幅度上面存在误差时，会在调制器的输出端产生邻信道泄漏。比如我们经常碰到的调制谱的问题。这里不展开讨论。

根据上面的公式推导，当输入信号在DC方面存在误差的时候，会产生载波泄漏(Carrier leakage)。这一点我们在后面分析相位误差产生机理的时候，会详细地谈到。

以上两方面都会对调制精度产生影响。所以我们在电路设计的时候，必须要降低IQ信号之间的相位、幅度和直流误差。

回到上面传统的发射机结构来，传统的二次变频结构有下面的缺点：

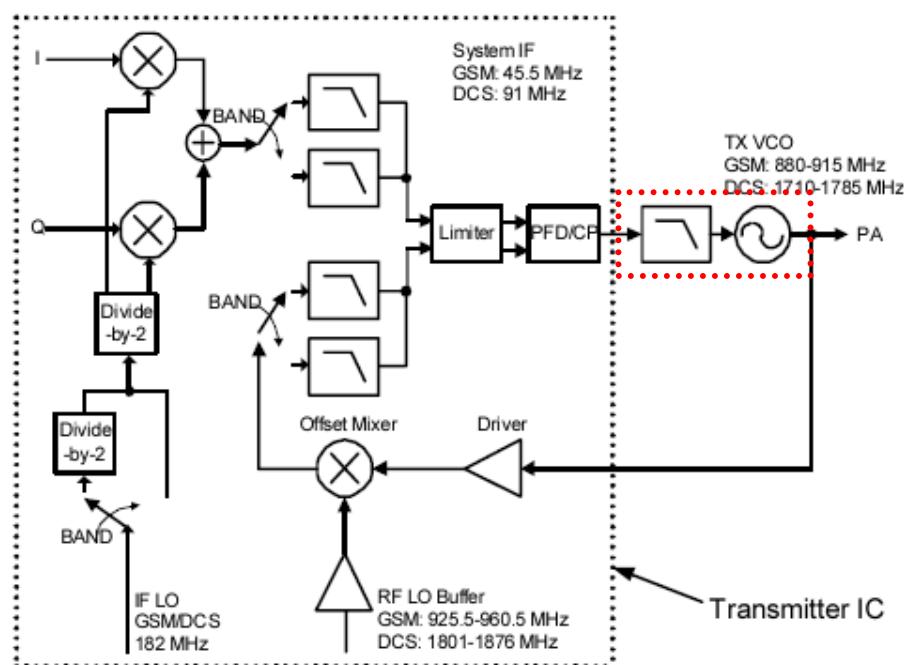
- (1) 使用中频通道选择器降低了集成度。
- (2) 耗电大。
- (3) 信号输出无法进行更好的杂散抑制。

为了克服上面的缺点，偏置锁相环结构的发射机就应运而生。

偏置锁相环发射机架构

调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。



如上图所示，基带信号经过一次上变频，变成中频信号。中频信号经过限幅后，通过锁相环路对一个电压控制振荡器（TXVCO）进行相位的调制，从而产生发射信号。

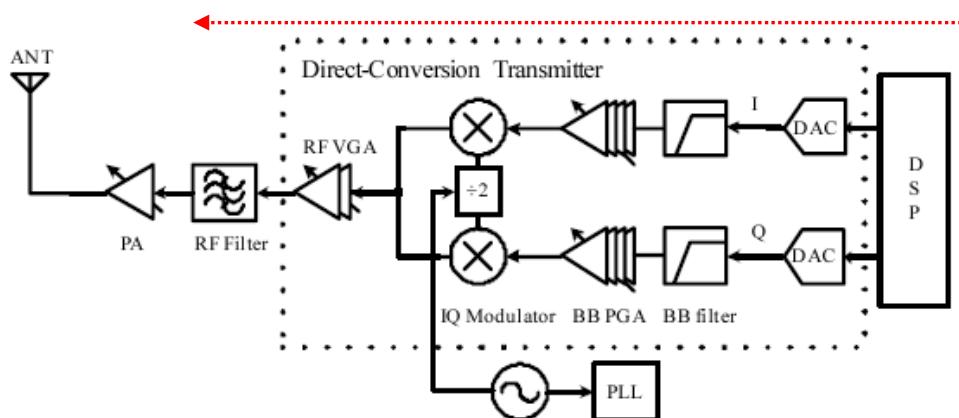
这种结构能够降低发射机的功率消耗，输出射频信号中杂散比较低，同时更适合IC集成设计。

当然，这种结构也有自己的缺点，仅仅能够用于恒定包络系统。另外因为偏置锁相环受到了环路带宽的限制，只能用于窄带通信系统。

偏置锁相环路发射结构广泛用于GSM系统中。后面的内容中，我们谈到NXP的参考设计的时候，会详细地谈到这些情况。

### 直接上变频发射架构

如下图：



基带信号经过混频器直接调制到射频。非常简洁。这样省去了中频选择滤波器和中频混频器。整个发射机能够被整合到一个芯片上面。发射机的增益可以通过（基带可编程增益衰

调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

减器) BBPGA 和混频器增益来控制。

采用这种结构的发射机载波带宽要比偏置锁相环结构大，并且适用于非恒定包络系统。我们看到 NXP 参考设计中，EDGE 也是采用这种结构。

当然，这种结构也有自己的缺点。由于本振信号和发射机载波频率相同，本振信号泄漏到混频器输出端后，无法虑除。因此载波泄漏比较严重。

过大载波泄漏造成接收机无法进行解调。下面简单分析一下EDGE 模式下的载波泄漏情况。当系统需要很大的动态增益范围时候，这个问题严重。当发射机功率降低的时候，泄漏的载波功率不会降低。因此当泄漏的载波和发射信号功率的比值到达一定程度的时候，接收机根本无法解调出信号来。为此，直接上变频发射机结构必须搭配载波抑制自动校正回路来使用，这样才能维持载波泄漏和发射功率之比为固定值。

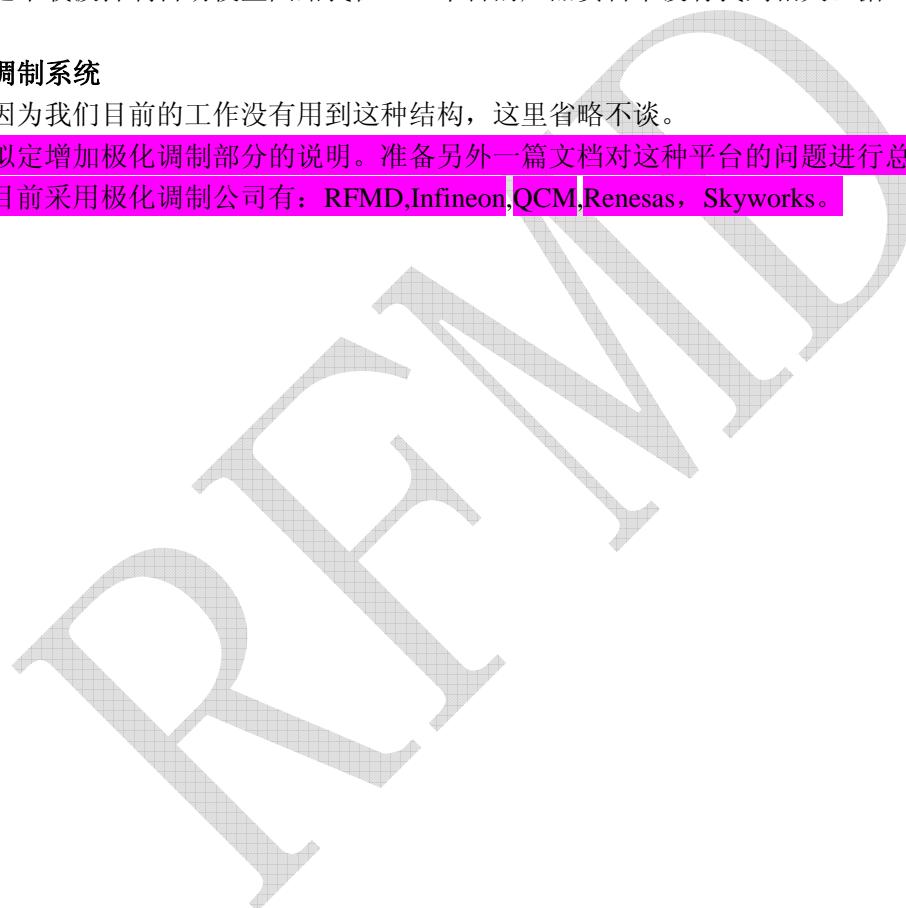
这个载波抑制自动校正回路我在NXP平台的产品资料中没有找到相关证据。

### 极化调制系统

因为我们目前的工作没有用到这种结构，这里省略不谈。

拟定增加极化调制部分的说明。准备另外一篇文档对这种平台的问题进行总结。

目前采用极化调制公司有：RFMD,Infineon,QCM,Renesas, Skyworks。



调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## NXP 平台发射机基础

在列出各种相位误差现象进行分析之前，有必要对 NXP 平台在发射机方面的演进做一些简单的描述。

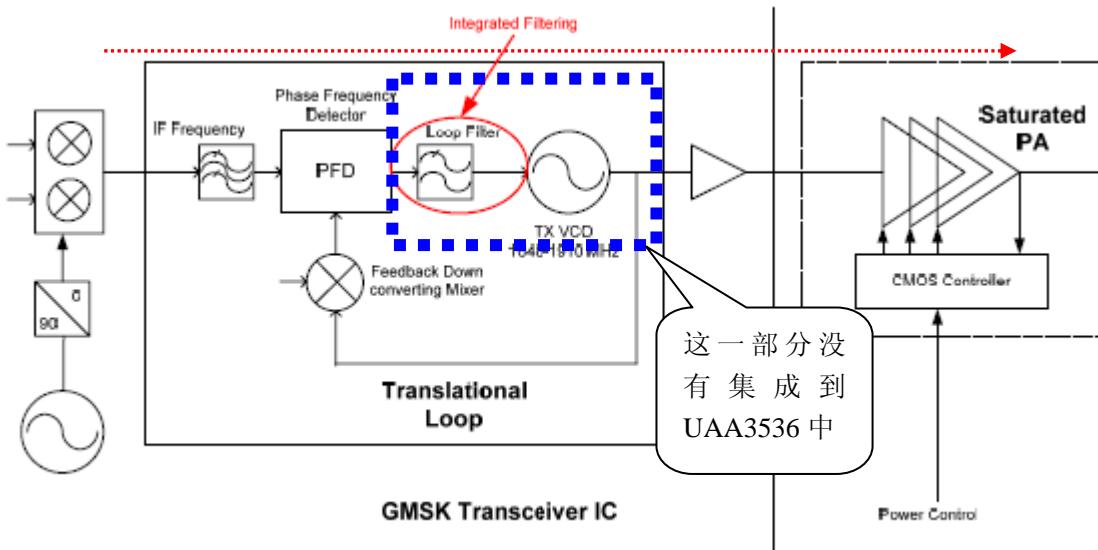
我们接触到的平台有 sysol2、sysol3、sysolme、Dragonfly 和 5210。这些平台采用的发射机结构是有变化的。

前文中谈到了，相位误差揭示了发射机的调制器性能。不同结构会带来哪些性能上面的差异呢？

我们略过基带部分的 GMSK 信号产生过程不谈，直接说说 RF 部分。

Sysol2 和 sysol3 采用的是偏置锁相环发射机结构。而 sysolme 和它以后的产品采用的是直接上变频发射机结构。因为这两种发射机结构的不同，带来在相位误差性能上面表现很不同。我们在 sysolme 之后的时代在相位误差方面迎来了比较大的挑战。

### 1. 偏置锁相环结构发射机(UAA3536)



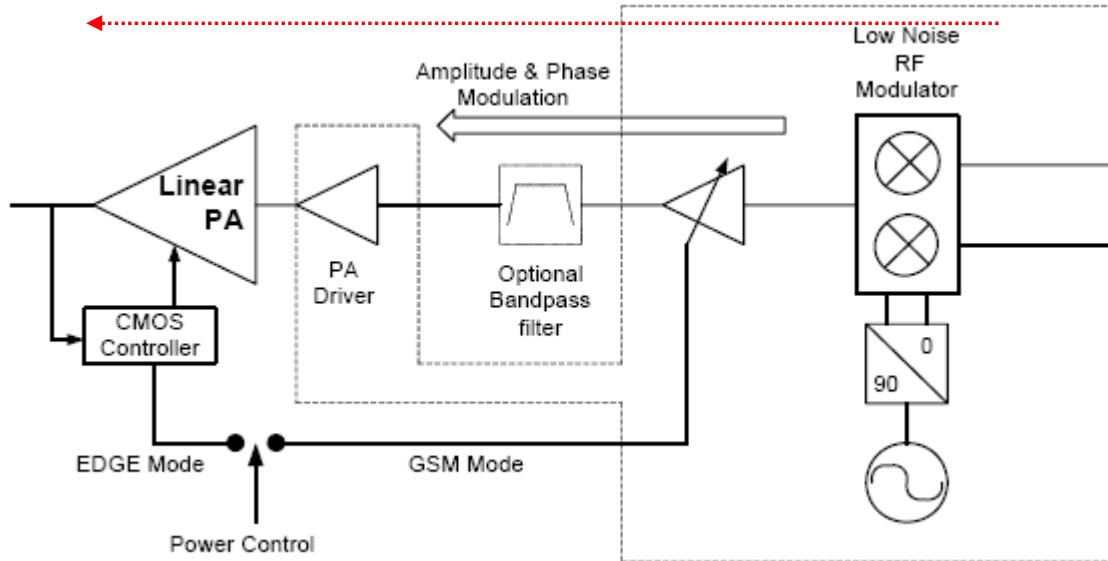
来自基带的已调信号分成 In-phase 和 Quadrature phase 信号 (I/Q)。这些信号加载到正交混频器上面，变成中频后，被一个偏置锁相环 (offset translational loop) 电路转换到载波频率。

这种解决方案主要的好处就是在相位频率检测器和发射压控振荡器之间的低通滤波器作用相当于一个带通滤波器。这个带通滤波器中心频点在载波上面 (可以这样来理解发射机结构)。

相位锁定环路在这里起到了关键的作用。这种发射机架构不需要外置的滤波器，并且在使用简单调制器的基础上面，实现了很好的输出频谱性能。经过几代的演进，集成度和成本方面都已经比较良好了。

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## 2. 直接上变频结构发射机(UAA3537,UAA3587,...)



这种直接上变频结构和上面讨论的发射机结构差别很大,没有发射环路,没有中频。也称作零中频。调制器直接将IQ信号转换到射频信号。正如你所看到的,发射机结构非常简单。但是,这种结构对射频调制器的噪声杂散性能的要求很高(记得TX SAW filter的故事吗?),同时对实际的电路走线也很敏感。

这就是为什么我们采用Sysolme和DF平台以来,射频设计面临的巨大挑战来自于哪里了。直接上变频结构带来了电路的敏感性增加。相位误差Phase Error就是一个经常令人头疼的问题。

小结:前面为大家准备了一些基本概念和射频发射机架构的知识。受篇幅限制,并没有详细的说明,请参考相关文档。

牢靠的基础知识是我们举一反三分析问题的源泉。在实际工作中我们才能够不局限于本篇所举的例子。

下面进入正题。

调试电路的基础原则:

- 多看layout。
- 先考虑软件TAT参数修改,再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸,多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## 相位误差故障分析和调试

以上我们讲了很多结论性的东西，往往对一件事情直接描述后，给出结论。这样可能让大家比较困惑。比如说，为什么直接上变频结构就比偏置锁相环路结构在电路设计上面挑战更大？相位误差到底是怎么出现的？由于理论水平有限，只能这样敷衍一下了。

下面就一些电路设计的实际问题进行举例分析。希望能够拓宽大家的工作思路。

相位误差测试我们在实际工作当中分为传导测试和辐射测试两种。以下叙述中不分开讨论。另外 TC UAA3536 已经很少有人使用了。后面所有的讨论只针对直接上变频系统。

和相位误差相关的几个因素如下：

- I/Q 信号直流分量不平衡
- Balun 电路
- 收发器 TC 和功率放大器 PA 之间的匹配滤波
- 功率放大器输出匹配
- 天线开关 ASM 控制线的退耦
- 发射功率通过接收回路的功率回馈
- 辐射测试下，天线失配问题等等情况
- 和屏蔽罩（shielding can）相关的一些问题
- PA 的供电问题
- 26MHz oscillator 稳定性
- Transceiver 供电线退耦问题

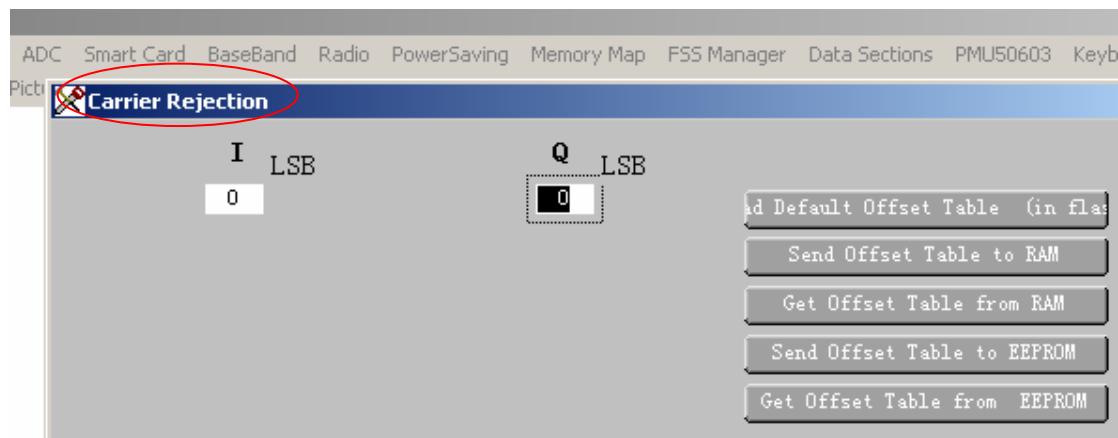
下面的文字将会对以上列举的情况进行具体的电路分析，一些常用的电路调试方法也会被介绍到。

调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## I/Q 信号直流分量不平衡

IQ 信号的不平衡，包含幅度、相位和直流分量三个方面。因为前两项，我们都无法修改，略过不谈。这里仅仅说说直流分量。



**分析：**首先我们看上面的图片。这就是在 TAT 软件中我们能够进行调节 IQ offset 的地方。许多人对这个 IQ offset 到底是什么意思，弄不清楚。在工作中需要深入分析和解决问题的时候，碰到困难。注意图片中窗口左上角的英文字母。Carrier Rejection 载波抑制。这里表示 TAT 软件在对 IQ 信号中的直流分量进行调节。保证 IQ 两路在直流分量上相等。

在上面射频发射机基础一章中，我们对变频器有一个简化的数学公式。我们知道，如果在进入混频器时，如果存在直流分量，那么在输出端，我们会看到载波泄漏 ( $D \cdot \cos W_c \cdot t$ )。

这就是为什么 TAT 中将 IQ 直流分量调节说成是 Carrier Rejection 的原因。



至于为什么调节直流分量会对相位误差产生影响呢，我自己也理解不清楚。我以前的想

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

法是直流分量只是决定了星座图上面的原点偏移量而已，不会对实际的相位轨迹产生影响。

但事实上我的理解可能是不全面，或者有问题的。载波泄漏为什么会导致了发射机的相位误差问题？需要进一步理论解释和实验验证。

抛开这个问题，由此我们可以得出这样的调试电路的方法：

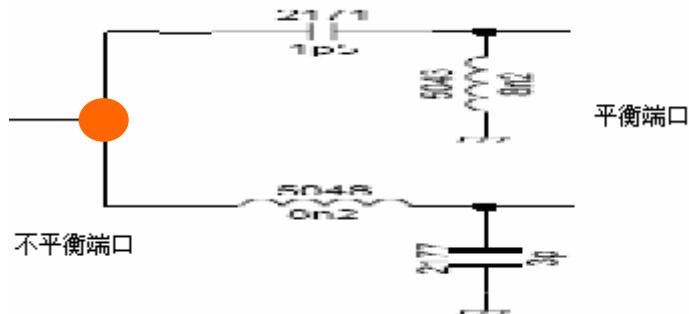
- 出现相位误差问题的时候，察看原点偏置这项指标（CMU200 可以,8960 我们没找到这项测试）。如果 Origin Offset 差于-30dB，那么可以调节 IQ Offset 来试试看，看看能不能解决问题。
- 大功率下面相位误差大，小功率下面也大，原因之一 IQ Offset 方面的问题，原因之一可能是 TC 供电管脚的退耦，原因之一可能是 TC 射频输出负载有问题。

前文中提到，现在我们用的射频发射机结构都是采用直接上变频结构。直流分量对此的影响是非常大的。我们知道一个直流分量加载到混频器上面，混频器将会输出相应的频率分量。非常明显，多少直流分量，将会在混频器之后产生多少的载波泄漏。这一点需要提醒大家注意。

### Balun 电路

**分析：**Balun 的本意是不平衡变压器的意思。在我们的系统中，作用是将平衡差分的 2 路信号，转换成不平衡的单端信号。

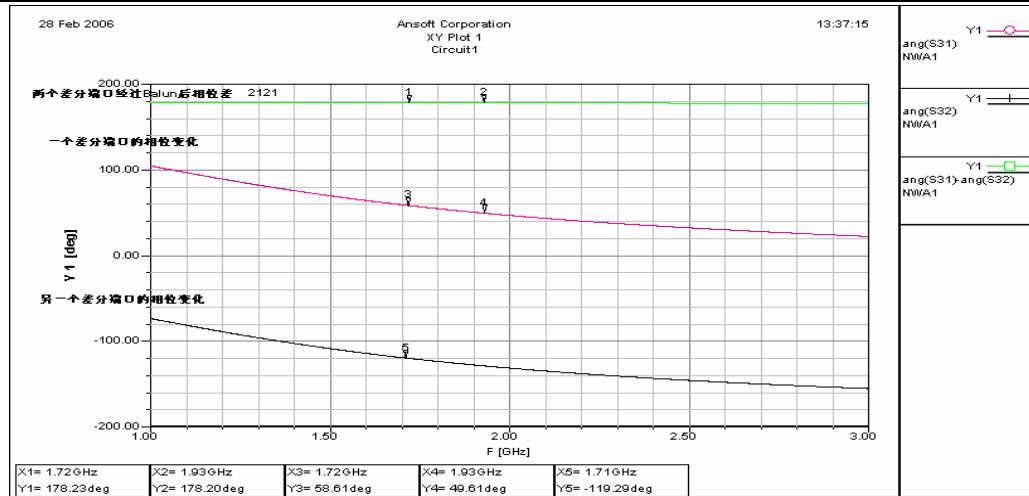
Balun 本质上是移相电路。常用的是用绕线变压器来实现阻抗和平衡到非平衡的转换。我们这里用的是 LC 组成的移相电路。



我们用 ansoft designer 进行简单的原理图仿真。结果如下：

调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。



理想的两路差分信号之间的相位差是 180 度。经过 LC 移相 180 度后，在非平衡端口进行正相叠加。

下面我们简单用公式推导一下，了解一下 balun 到底带给我们什么。

这里假设在 Balun 的单端口这一点，来自两个差分两路的信号假设为  $a\sin(\omega t)$  和  $b\sin(\omega t + n)$ 。这里的  $a, b$  表示 Balun 不同两路带来的幅度不平衡， $n$  表示相位不平衡，也就是说，Balun 没有带来准确的 180 度的相位差。我们假设对于 200KHz 带宽的 GSM 信号，在 200K 带宽内所有频率信号的幅度不平衡和相位不平衡都是相等的。为什么这么假设，后面将会讨论到。

于是我们有了下面的公式推导：

$$\begin{aligned}
 & a\sin(\omega t) + b\sin(\omega t + n) \\
 &= a\sin(\omega t) + b[\sin(\omega t)\cos(n) + \cos(\omega t)\sin(n)] \\
 &= a\sin(\omega t)\cos(n) + b\cos(\omega t)\sin(n) + a\sin(\omega t) \\
 &= [a + b\cos(n)]\sin(\omega t) + b\sin(\omega t)\cos(n)
 \end{aligned}$$

这里不一一推导了。最终结果是：

$$a\sin(\omega t) + b\sin(\omega t + n) =$$

$$\sqrt{a^2 + 2ab\cos(n) + b^2} \cdot \sin \left[ \omega t + \arccos \frac{a + b\cos(n)}{\sqrt{a^2 + 2ab\cos(n) + b^2}} + K \cdot 2\pi \right]$$

或者是

$$-\sqrt{a^2 + 2ab\cos(n) + b^2} \cdot \sin \left[ \omega t + \arccos \frac{a + b\cos(n)}{\sqrt{a^2 + 2ab\cos(n) + b^2}} + K \cdot 2\pi \right]$$

我们来一起分析一下上面的结果。

根据实际情况，上面结果中的有一些解要被舍弃的。姑且不讨论这个问题。

1. 我们看  $\sin$  函数前面的系数。如果相位不平衡  $n=0$ ，也就是说，Balun 能够正好完

成 180 度的相位变化。那么 Sin 函数前面的系数，就等于  $(a + b)$ 。也就是说在 Balun 完成 180 度相位变化的时候，差分的两路信号能够完全的正向叠加。没有能量的损失。(这里不考虑电路本身的插入损耗。) 如果  $n$  不等于 0 呢，带来的后果是能量的损耗。也就是 1 加上 1 小于 2 的问题了。

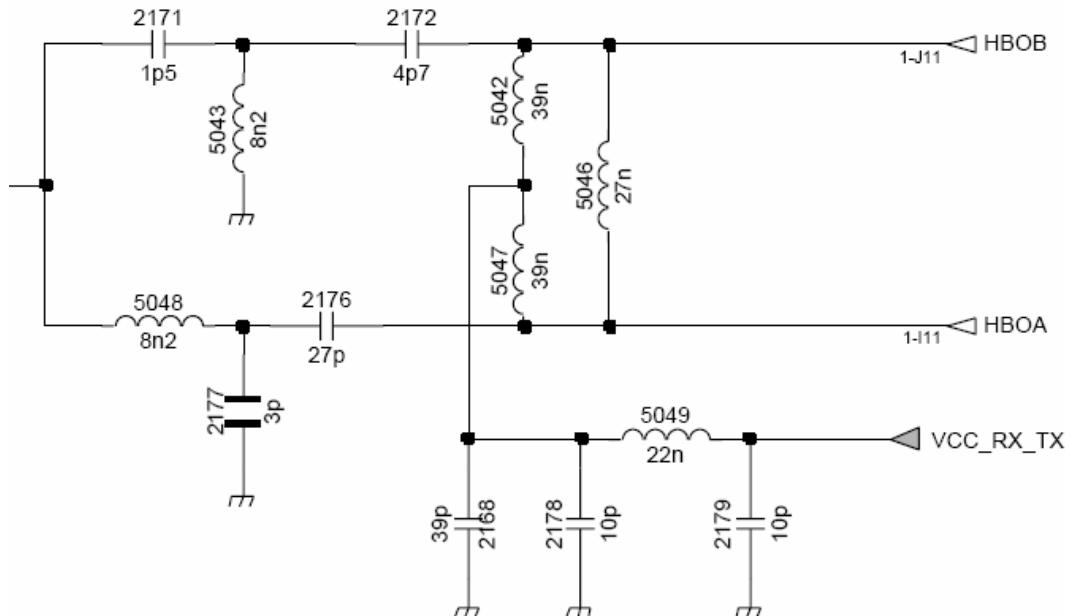
2. 我们看 Sin 函数里面。信号经过 Balun 后，并没有产生额外的频率分量。仅仅是在相位上面有了一个相位的延迟。

$$\text{arcCos} \frac{a + b \cos n}{\sqrt{a^2 + 2ab \cos n + b^2}} + K \cdot \pi$$

当然，这个  $K \cdot \pi$  根据实际情况可能不存在的。因为一个电路的相位延迟应该是固定的。肯定不是一个周期的数。同上我们可以推论， $n=0$  的时候，相位不平衡等于 0。也就是说 Balun 在正好完成 180 度相移的情况下，差分两路在单端口叠加不产生相移。如果  $n$  不等于零呢，这样差分信号在不平衡端口叠加的时候，就会产生相移。这个相移也不会对信号的解调产生任何的影响。因为对电路来说，这个相移是固定的值。我们看作是线性失真。信号的线性失真我们是可以通过系统设计来解决的。用同样的方法分析  $a$  等于  $b$  和  $a$  不等于  $b$ ，结论是相似的。

3. 由此我们得到初步的结论：**不论 Balun 电路完成 180 度相位变化的好坏，或两路有幅度不平衡问题，都不会对 phase error 相位误差产生影响。**
4. 那么问题出现了，为什么我们实际电路调试当中碰到的 Balun 电路对 Phase error 影响还是非常大的。矛盾出现了！

我们以下面的原理图进行分析。



调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

在图中 5046/ 2172 /2176/ Balun 这些器件共同构成了 TC 混频器输出的负载。将 5046 的值变小，将会直接让相位误差变好，同时功率放大器的输入功率将会降低。过低的功放输入功率会导致放大器无法输出到额定功率，同时切换谱恶化。

设计电路的时候，我们在功率放大器输入功率和相位误差之间折衷考虑。

由此我们想这样解释上面的矛盾。**改变 Balun 电路对混频器的负载影响比较大，从而影响了相位误差的性能。**

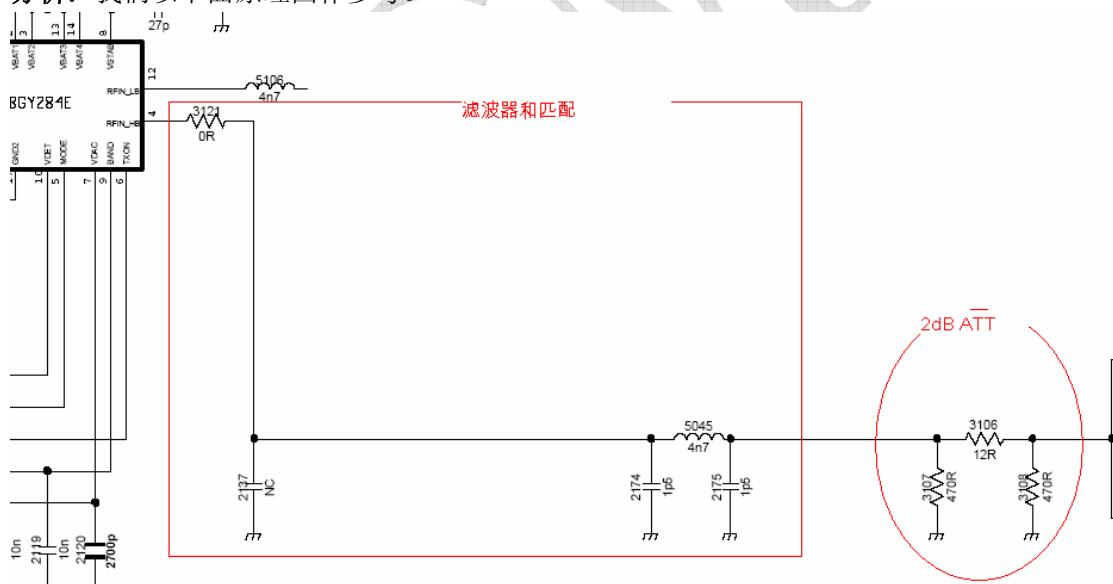
这个问题因为个人水平的限制，无法给出一个合理的解释。

5. 前文中我们提到了**这里我们假设对于 200KHz 带宽的 GSM 信号，在带宽内所有频率信号的幅度不平衡和相位不平衡都是相等的。**以上所有的分析都是基于这个基础的。我们知道在 GMSK 信号带宽约为 200KHz。200KHz 带宽内信号的相位，随时间的变化携带着我们所需要的信息。Balun 本身对 200K 内不同频点的信号相位不平衡和幅度不平衡是不一样的。说得有点绕口了。简单理解为一个载波信号经过 Balun 后，频率响应是不同的。这里我们也对此忽略不计。Balun 的选频特性对于 200KHz 的带宽来说，表现不明显。

**结论：**适当的改变 Babun 电路，和其他 TC 负载相关的器件，能够影响到相位误差的性能。

### 收发器 TC 和功率放大器 PA 之间的匹配滤波

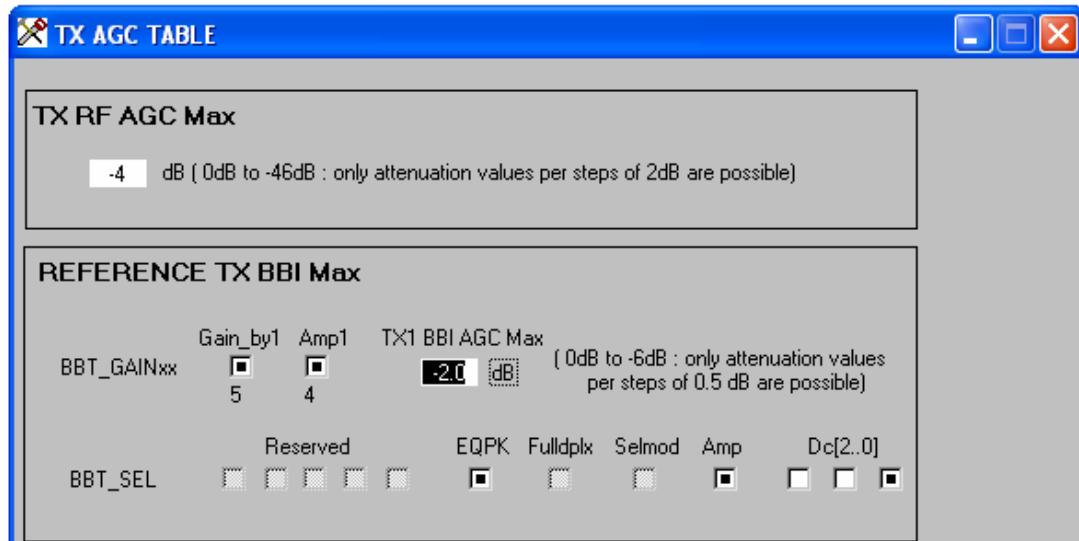
**分析：**我们以下面原理图作参考。



1. 保证电路两边良好的隔离，负载变化对 TC 影响减小。我的理解是这样：因为 PA 工作在不同的功率等级时，三极管的结电容大小是不一样的。所以不同的功率等级情况下，PA 的输入阻抗是变化的。为了克服阻抗变化带来的影响，采用了 50 Ohm 宽带的电阻衰减网络。（Google: VCO Load Pulling）

2. 灵活调节功放的输入功率。

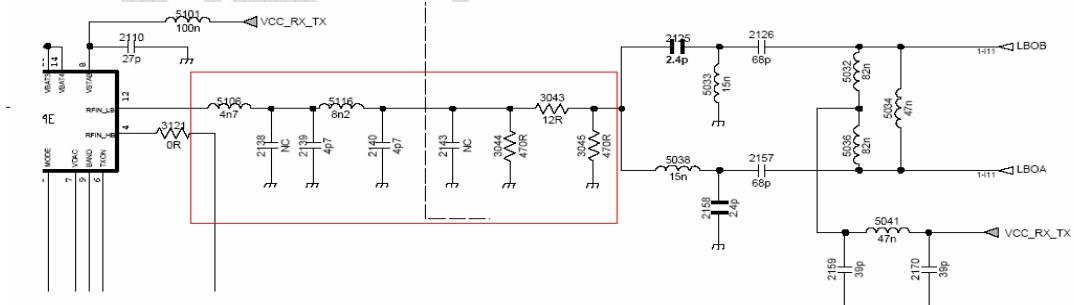
实际调试 NXP 的平台，发现电阻网络用处并不大。PA 输入功率调节我们可以通过 TC 内部的 RF AGC 来调节。至于克服 PA 输入阻抗变化的影响，我还没有明显感觉到这种作用。我的建议是：电路上器件的位置可以保留。调试电路的时候，可以更换为其他器件。



上图中的 RF AGC 和 BBI AGC 选项，分别说的是 TC 内部输入混频器前的衰减器和基带部分的输出 IQ 幅度调节器。一般来说，越大的衰减，意味着更好的相位误差（也有例外的），更小的 TC 输出功率。慎用。

下面我们再来谈谈 PA 输入端的那一堆电感和电容。射频设计的不确定性、芯片内部设计资料的缺乏和工程师水平的限制，以上原因，让我们放了一大堆 0 Ohm 和 NC 的器件。

我们来看看 NXP 的 Dragonfly 平台参考设计的电路匹配：



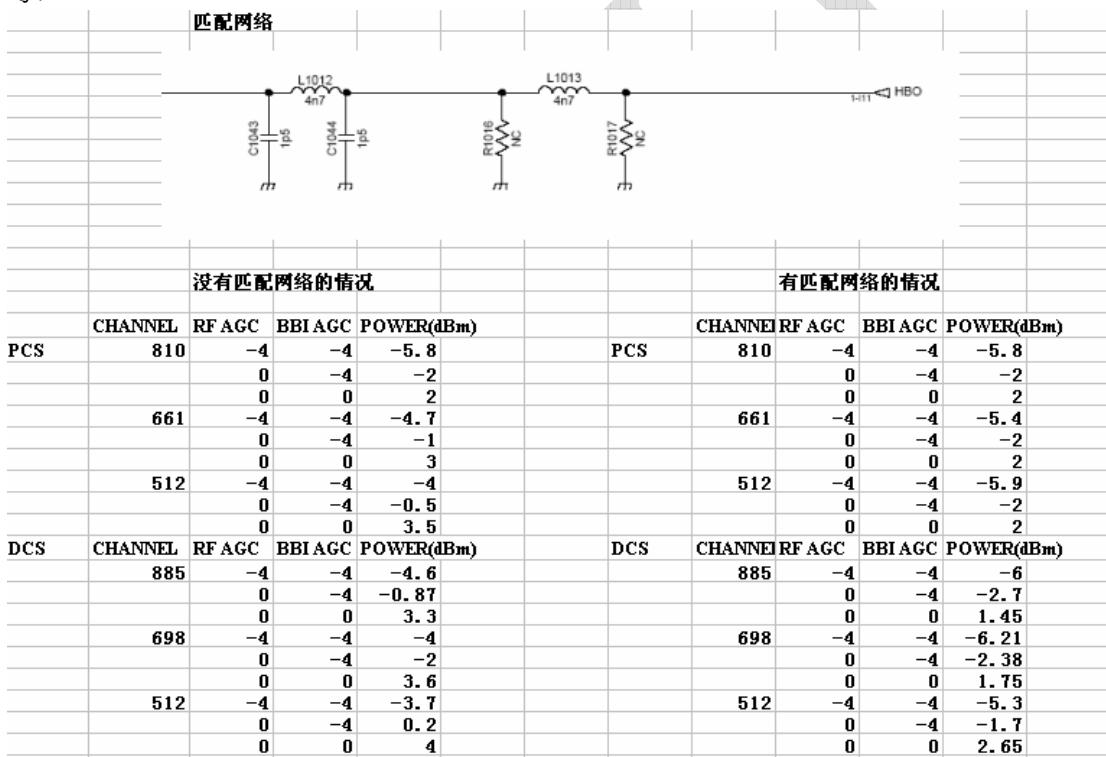
红色线框内器件相当多。可见 NXP 自己对这一部分的电路也是给予相当的 **关注** 的。下

下面是优化改进后的电路。



调试这一部分电路的方法没有太多的理论可以说。最好的方法是用手碰碰这些器件，如果发现相位误差有较大的改善。那么试着增大器件的值，看看有没有好的效果。一般的经验是电感电容的值越大，效果越好。在 TC 输出管脚旁边放置一个 PI 的 LC 滤波网络效果会比较好。一般的做法是 TC 这边放一个 PI，PA 这边放一个 PI。

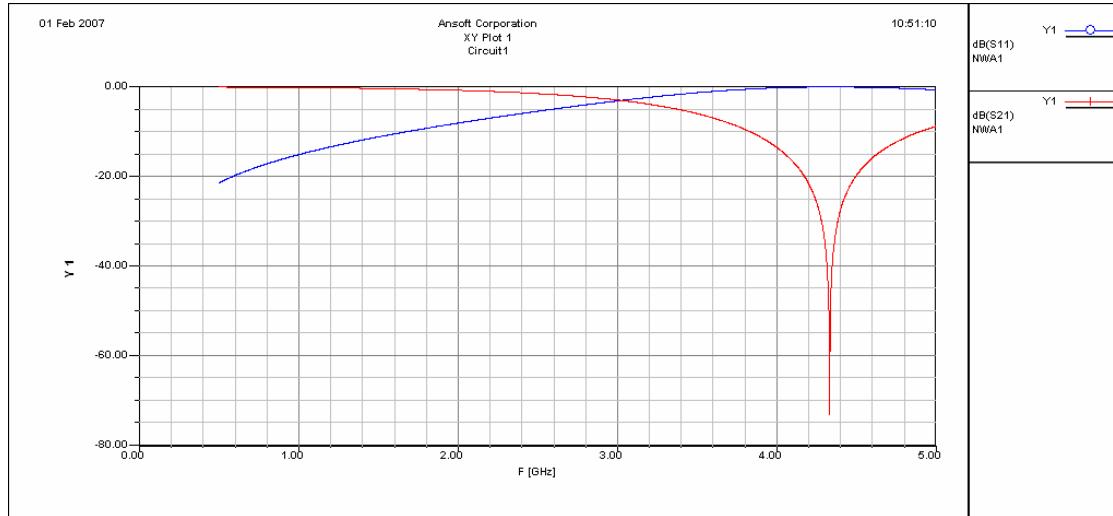
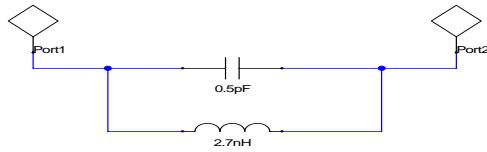
再次说明一下：注意 PA 的输入功率不能太低。下面是实际测试到的 TC3587 输出功率，供参考：



有信息说 PA 的二次谐波反馈到 TC 容易造成 TC 内部的本振合成电路工作不稳定。从传导的路径看，二次谐波反馈回 TC 的主要路径有二：一是通过 PA 的输出反馈回 TC 的，二是通过 PA 和 TC 之间的匹配电路反馈给 TC 的。在下一小结中我们会看到如何消除 PA 输出谐波的影响。

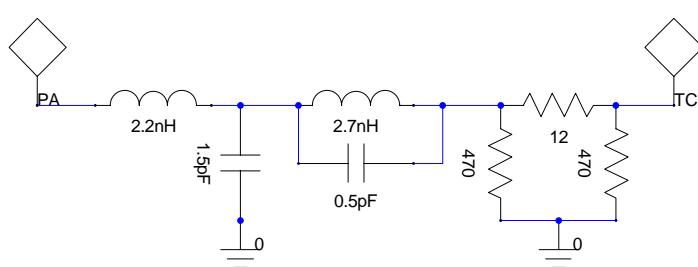
我建议在上面的 PI 衰减电路和 PA input 之间增加 LC 谐振电路来保证良好的二次谐波抑制。

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。



需要说明的是：这里的 LC 选择需要仔细调试。因为电路上面的寄生参数对于几 G 的工作频段来说，是很需要考虑的。

常用推荐电路：



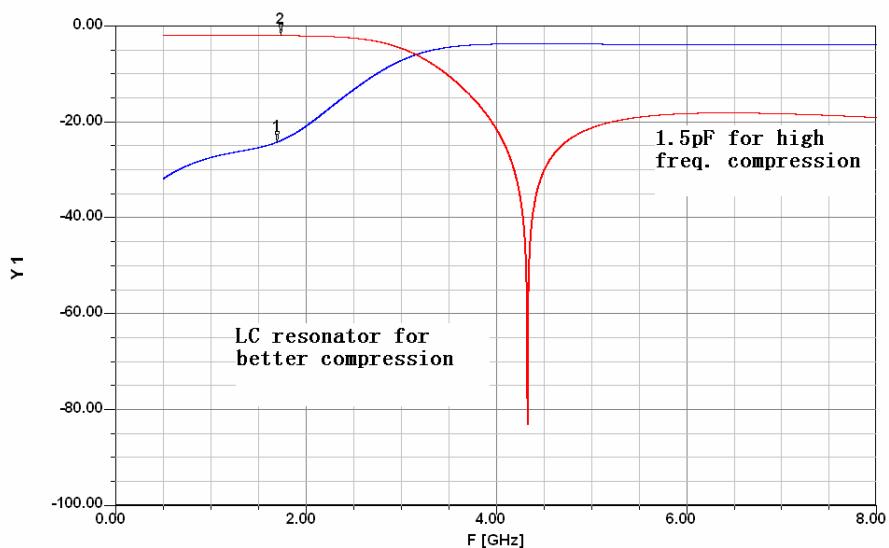
调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

10 May 2007

Ansoft Corporation  
XY Plot 2  
Circuit2

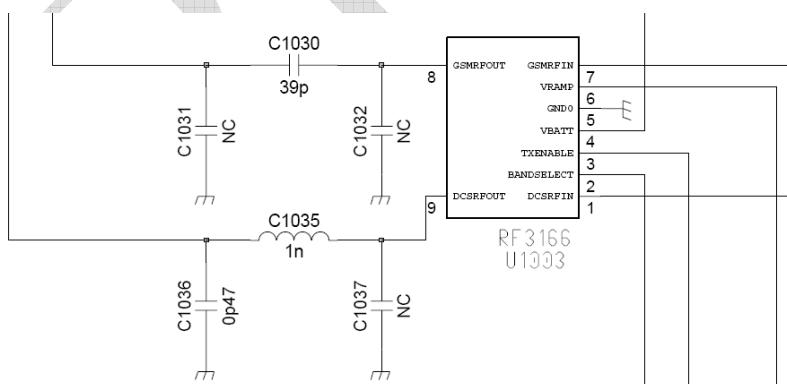
15:02:12



### 功率放大器输出匹配

**分析：**

我们看下面的原理图：



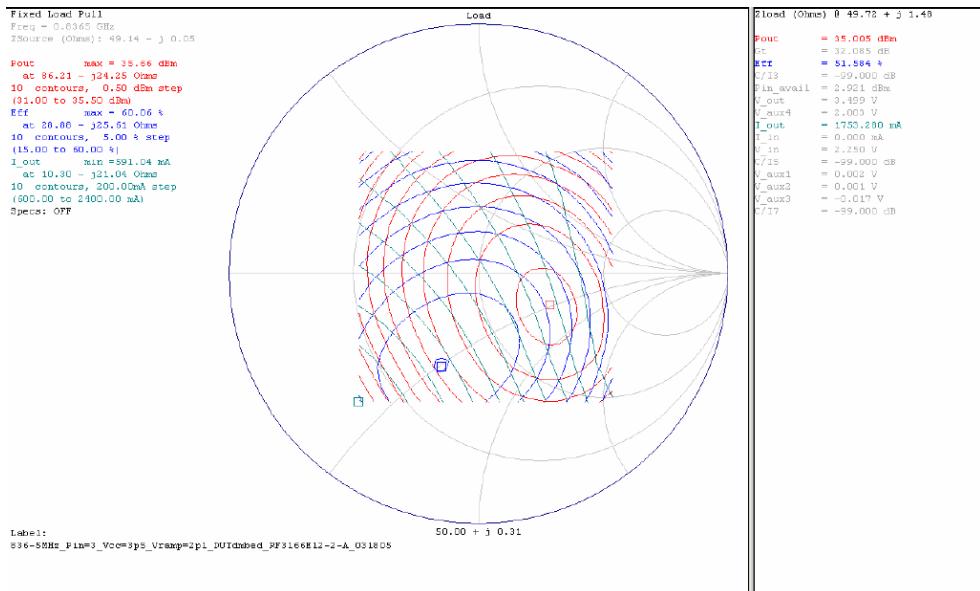
首先看看 PA 输出的基本设计原则：

1. PI 型器件放置是常用的电路。将来在抑制谐波，调节输出匹配等等，都有很大的余地。
2. 选择低通滤波器时，需要注意插入损耗。一般常用的网络有 0.2dB 左右的功率损耗。
3. 输出走线避免走的太长，不要走直角拐弯。注意包地屏蔽。

再来看看 PA 的 load pull 数据方面的信息。下面是 RFMD3166 的 Load Pull 数据。供参考。

调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。



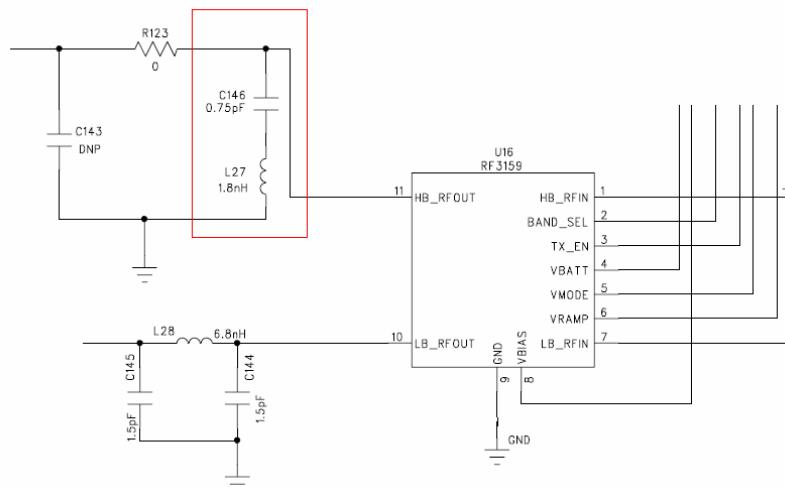
我的理解是一般会在输出的效率和最大功率之间取一个折衷。

测试功放的输出阻抗时候，可以用网络分析仪。这里不赘述了。关于如何调试 PA 的输出匹配，请参考《优化 RF3166 PA 效率之实例分析》一文。

如果设计电路的时候，考虑到上面的几个因素，一般不会有太大的偏差。调试电路的时候，用手指或者镊子，碰碰功放的输出电路。看看有没有变化。如果发现对 phase error 影响比较大。就需要关照一下 PA 的输出匹配了。有时候我感觉射频工程师的手指真是非常不错的 debug 工具。

在 PA 输出串联一个小的电感有时候能改善相位误差的情况。这可以供大家参考。具体的原因可能和 PA 的二次谐波有关系。

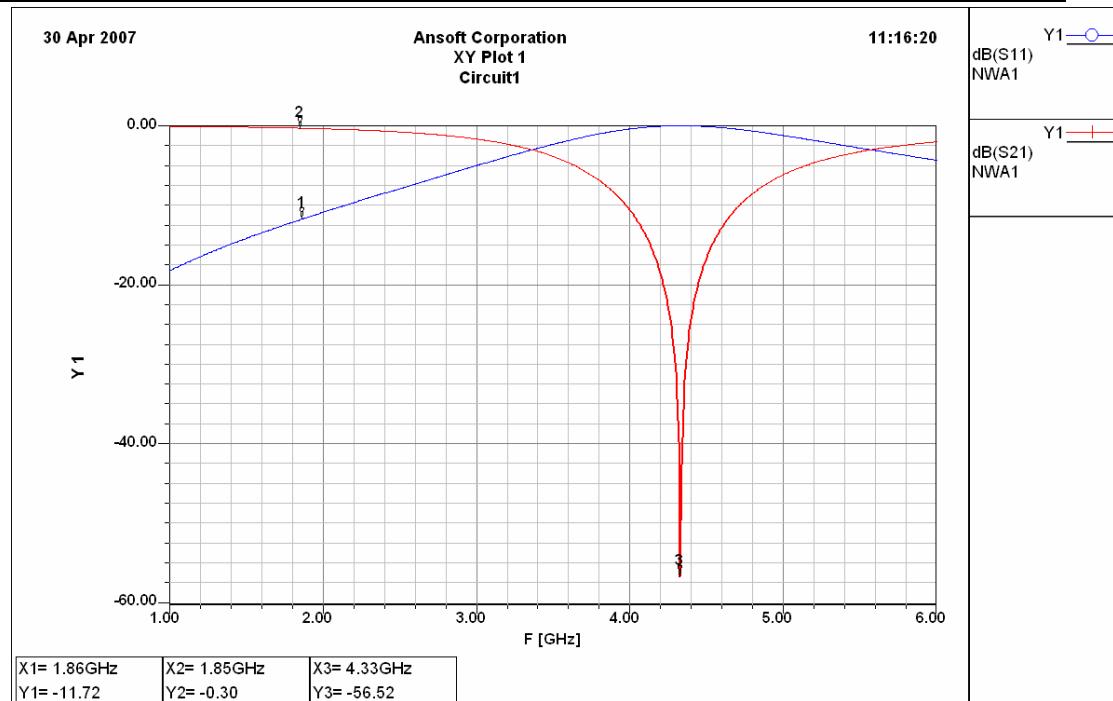
说到二次谐波的问题，我们再看下面的原理图。



大家注意在 HB\_RFOUT 上面的 LC 谐振电路。简单的仿真结果如下：

调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。



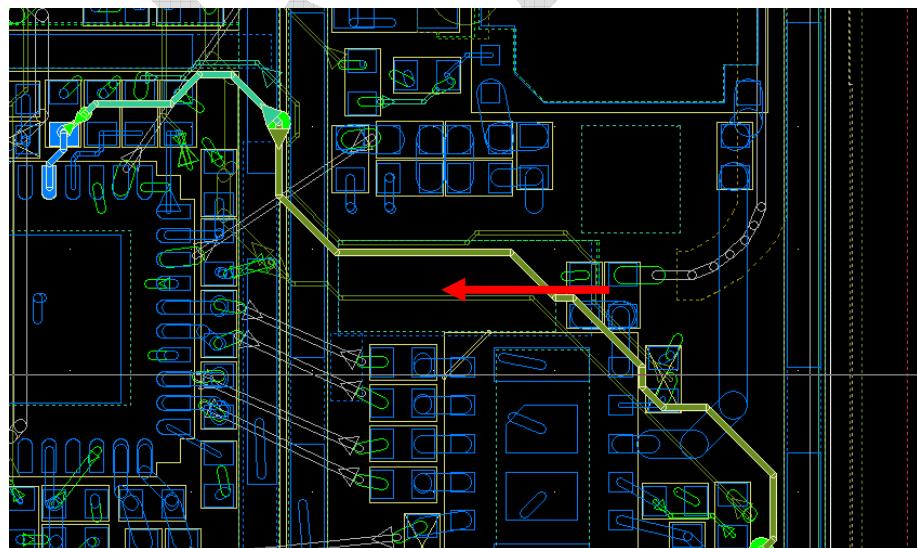
从上面的分析结果可以看出，这个 LC 电路，对载波信号有一定的衰减，但是对二次谐波或者三次谐波会有一个比较大的反射。

我们在调试电路的时候，如果需要考虑到 PA 输出谐波的相位误差的影响，可以采用上面的手段进行调试。但是尽量慎用。因为会增加 PA 到天线开关衰减。

### 天线开关 ASM 控制线的退耦

分析：

我们以下图为例简单说明。

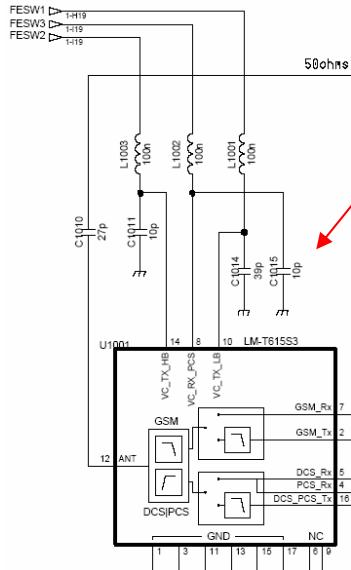


上图中高亮的线条为 TC 对天线开关的控制线。

射频功率如果从天线开关反馈到了 TC 这边。将会造成相位误差的问题。这时候我们可

- 调试电路的基础原则：
  - 多看 layout。
  - 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
  - 多用手触摸，多思考。
  - 从不断否定中找到正确答案。

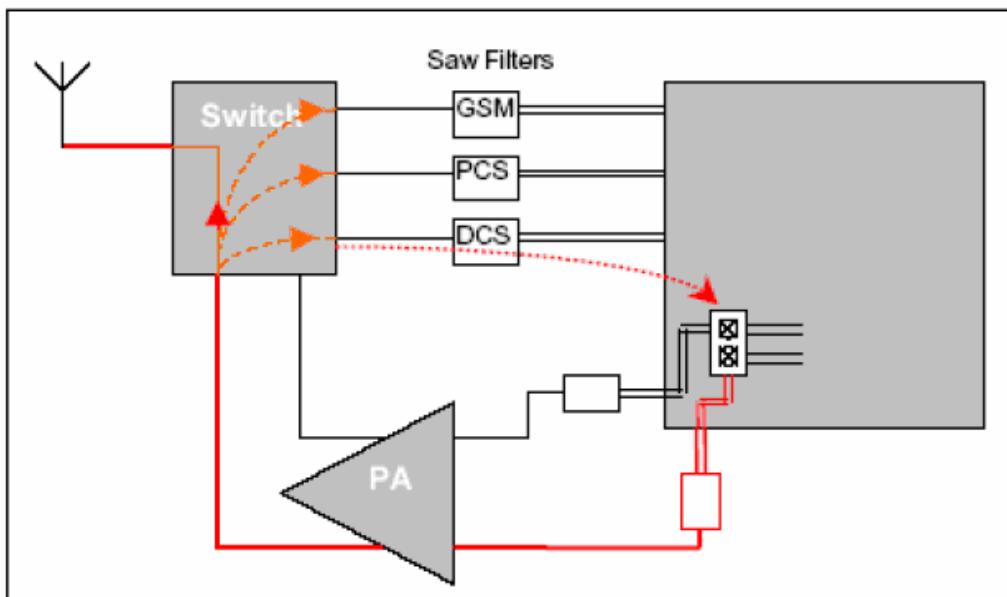
以通过调节 FSW 的串联电感和对地电容来进行改善。虽然 39pF 和 8pF 是常用的值，但是根据电路的实际测试结果修改一下电容值，有时候也是非常有效的。



### 发射功率通过接收回路的功率回馈

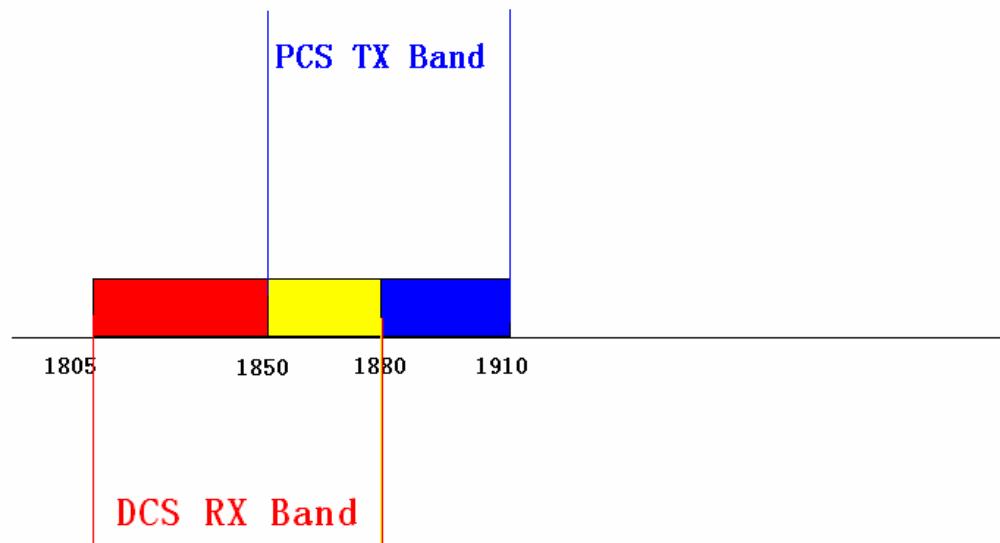
#### 分析:

这里我们来讨论经常碰到的发射功率通过接收回路，回馈到 TC 造成的相位误差问题。



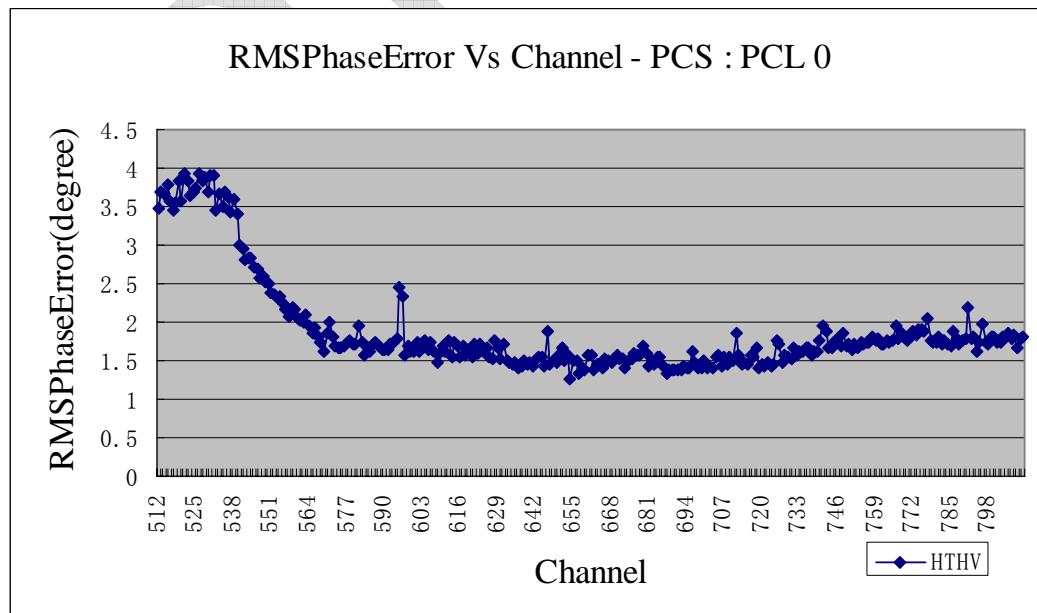
1. PCS的射频功率从DCS的接收通道反馈回来。
2. PCS的射频功率从PCS的接收通道反馈回来。
3. DCS的射频功率从DCS的接收通道反馈回来。

我们首先分析问题 1，PCS 频段的功率从 DCS 的接收通道反馈回来。这个是我们做三频段手机和四频段手机经常遇到的问题。



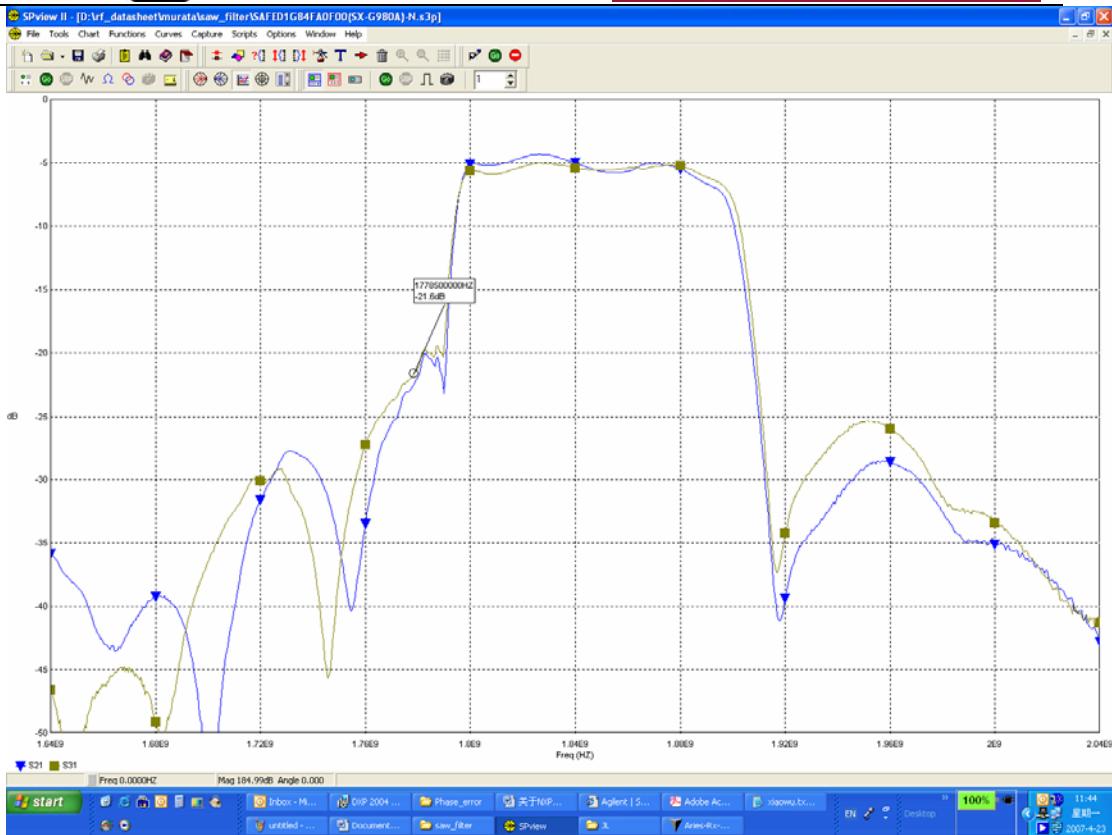
从上图可以看出，黄色部分是 PCS TX 和 DCS RX 频段相重合的地方。这样带来的问题是，功率放大器的 PCS 频段输出功率经过天线开关对接收端口的隔离后，会有一定的功率从 DCS SAW 通道反馈给 Transceiver，从而进入混频器进行二次调制。在这种情况下，DCS 的 SAW filter 已经不能对 PCS TX 频段的信号进行阻塞。

在我们测试手机全信道 Phase Error 的时候，就会发现手机在 PCS 512 channel 附近 phase error 很大。但是高信道却很好。参考下面的图片：



下面我们来分析问题 2 和问题 3，发射功率从本频段接收通道的反馈。

首先我们来看看一个常用 SAW filter 的频率响应特性。



请注意上图中的 Marker 表示点。在这里我们做一个简单的发射功率泄露到 Transceiver 接收端的功率预算。我们选取 RFMD 的 TXM RF7115 为例进行分析。下图为 RF7115 的隔离度指标。

Freq 1710MHz to 1785MHz					
RX1	8.50	10	dBm	Temp=+25°C, V <sub>CC</sub> =3.5V, P <sub>OUT</sub> =30dBm	
RX2	5.00	10	dBm	Temp=+25°C, V <sub>CC</sub> =3.5V, P <sub>OUT</sub> =30dBm	
RX3	-5.00	10	dBm	Temp=+25°C, V <sub>CC</sub> =3.5V, P <sub>OUT</sub> =30dBm	
RX4	5.50	10	dBm	Temp=+25°C, V <sub>CC</sub> =3.5V, P <sub>OUT</sub> =30dBm	

从上图可知，在天线端口输出功率 30dBm 的情况下，从接收端口最大泄露功率为 10dBm。那么经过 SAW Filter 衰减后，进入 Transceiver 的功率为  $10-21.6=-11.6$  dBm。

**调试方法：**用手触摸接收部分的电路。看看是否相位误差有改善。找到电路上面敏感的点。必要的时候，断开接收回路。用非信令模式，打开发射。

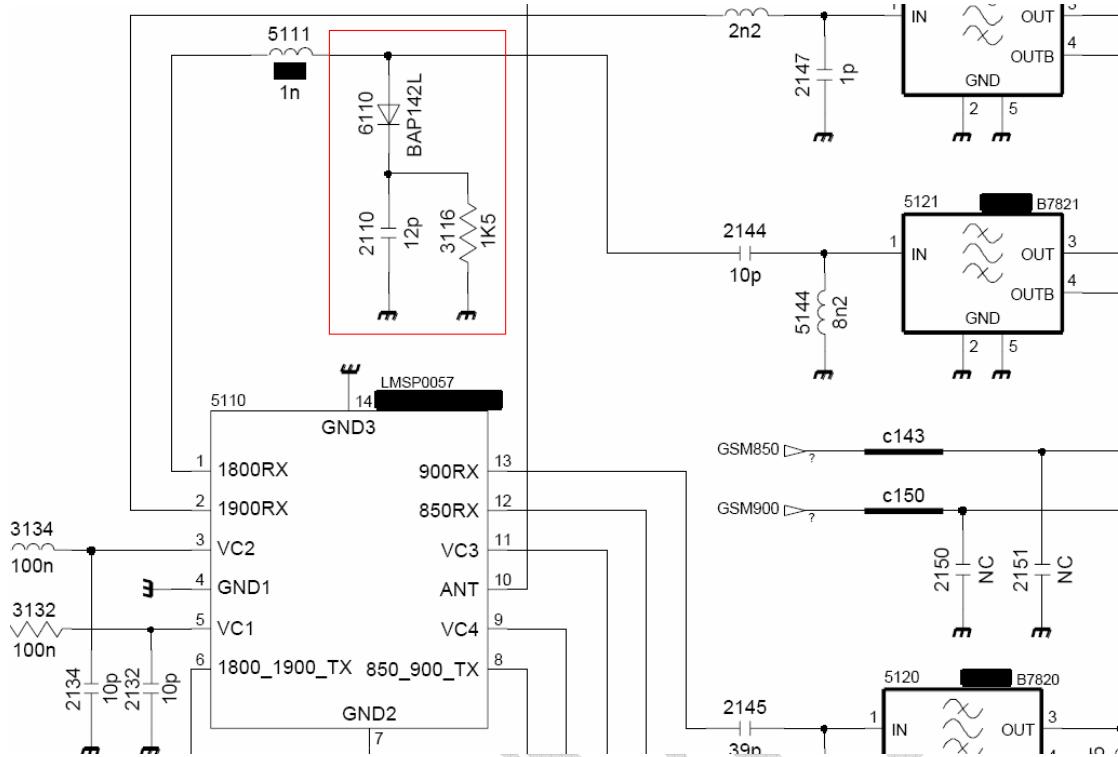
#### 解决问题的办法：

解决这类问题的根本方法是增加 TX 对 RX 的隔离度。

1. 提高 ASM 本身的隔离度。我们可以对供应商提出更高的性能指标要求。但很多时候，供应商并不能够满足你的要求。供应商需要在成本、接收插入损耗和隔离度方面综合考虑。
2. 调节 SAW Filter 的匹配，保证 SAW 的隔离度性能做到最优化。（曾经出现过这样的问题，SAW Filter 的接地孔没有做好，相位误差比较差。）
3. 在接收通道上面增加一个 Pin 二极管开关。

这里重点对解决方法 3 进行说明。

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。



如上图所示红色部分，我们在 DCS RX 路径上面增加了 PIN 二极管开关，来增加 High Band TX to RX 隔离度。工作机理如下：

当天线开关处于 DCS 或者 PCS TX 的时候，在天线开关 1800RX 端口上面会有直流电压，大约在 2.6V 左右。这个电压使 BAP142L 导通，那么射频功率会由 2110 这个 12pF 的电容导到地上。

当天线开关处于接收状态时候，DCS RX 端口没有直流电压，那么 PIN 处于关闭状态，不会对接收灵敏度带来影响。

### 辐射测试下，天线失配问题等等情况

#### 分析：

有时候我们碰到这样的情况：手机在传导模式下面，相位误差比较好；但是在辐射模式下，比如说生产线的耦合测试站，出现超标的情况。

造成问题的原因有很多。我列举一下我所知道的情况供大家参考。

1. 在辐射模式下，手机天线输出匹配不好，导致有部分射频功率反馈到接收回路，造成相位误差问题。解决方法是提高 ASM 的收发隔离度，修改 FSW 的退耦电容。
2. 在辐射模式下，PA 的输出功率受到负载阻抗的影响，发射功率增大。解决的方法是调整输出匹配，并且选择更好的天线。
3. 在辐射模式下，手机屏蔽盖激起的电流，影响到了 PA 和 TC。解决方法是改善屏蔽盖的接地情况。多加地孔。尤其是 TC 附近 26MHz 振荡电路要注意屏蔽保护。

关于辐射模式下的相位误差测试，ETSI 的标准里面并没有这一项的测试。但是我认为辐射下面的相位误差的好坏，对于手机用户的网络体验非常重要。

调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

有一些手机设计公司，自己制定了一些内部的测试标准。比如在耦合测试条件下，将手机放到大的金属板上，进行一系列性能指标的测试。这些都是比较好的方法。

### 和屏蔽罩（shielding can）相关的一些问题

#### 分析：

屏蔽罩带给我们的麻烦非常得多。这点大家都是深有体会的。一个 PCBA 在没有屏蔽罩时候，可能相位误差非常好。但是，加上屏蔽盖后，会变得非常差。

问题的症结在哪里？大家都想知道答案，可能谁也说不清。屏蔽盖影响了电路的匹配，屏蔽盖造成电路前后级的不稳定等等说法都有。

总的来说，手机电路板器件布局越来越密集，屏蔽盖高度越来越低，走线密集得地孔打不下去，这些都给射频工程师带来更大的挑战。

关于问题的症结，我想是射频功率的回馈造成 Transceiver 调制精度下降。这里的射频功率指的是载波的功率和放大器产生的谐波的功率。主要需要考虑的是二次谐波和三次谐波。（这个地方需要重新改写，重点讨论 injection pull 和谐波影响调制的机理。）

当然，以上仅仅是猜测，有可能想法是错误的。

因为水平限制，暂时无法给出一个比较完美的解释。

我们有了下面关于射频 layout 和 debug 的建议：

1. 对于射频部分的供电退耦电容和匹配器件，器件的地孔不要和屏蔽罩的地孔连在一起。
2. 屏蔽罩的地孔直接到主地上。
3. TC PA 发射链路上面，越好的谐波抑制电路，意味着越好的相位误差性能。
4. 各种射频器件的逻辑控制信号供电电源，注意在 DCS PCS 频段的退耦。
5. 功率放大器和 TC 使用不同的 shielding。

上面的建议都是根据自己的 layout 经验来谈的。每个人的经验可能是不同的。这是见仁见智的事情。保证最小的射频信号回流面积是一个基本的原则。

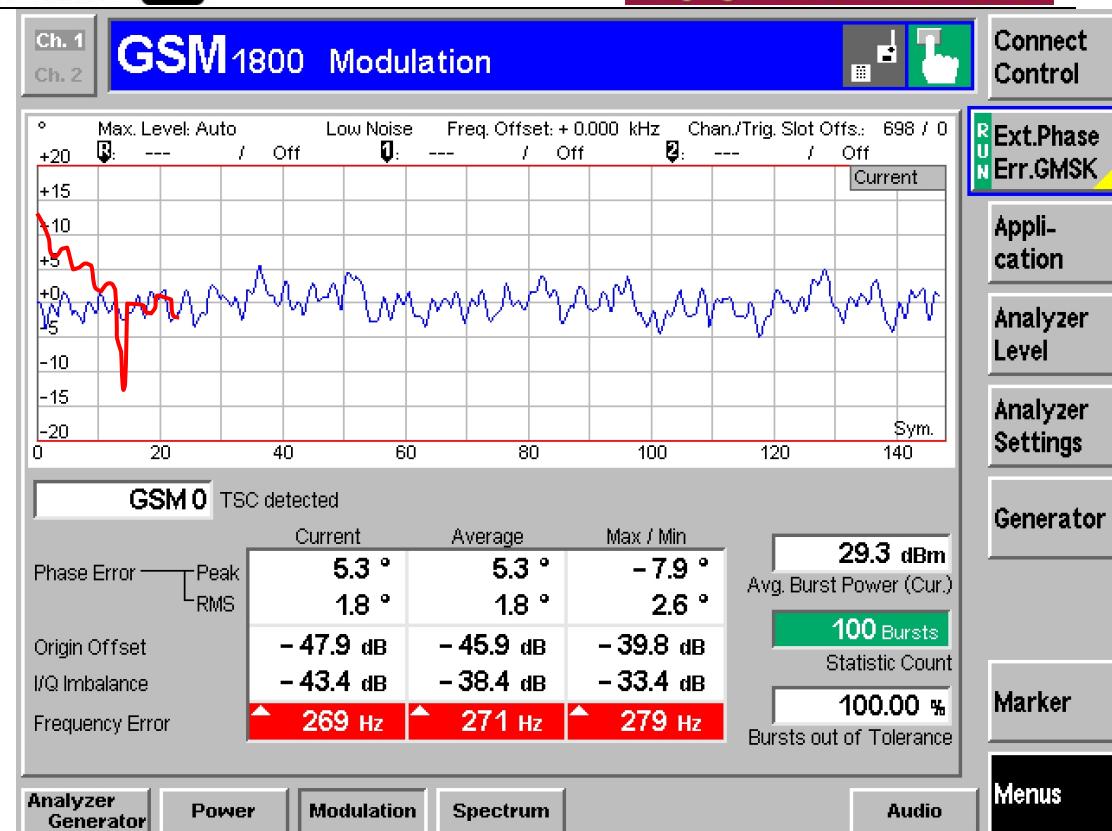
### PA 的供电问题

#### 分析：

关于功率放大器的供电问题带来的相位误差，这种情况出现的比较少。大家都很注意供电线上的直流阻抗了。如下图所示，如果出现相位误差出现红色部分的情况，一般是因为 PA 供电的压降太大造成的。根本原因是电源走线太长或者太细。

可以通过增加储能电容容值和加宽电源走线来解决。

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。



当然和功率放大器相关的相位误差其他的原因很多。但是因为 GSM 是一个恒定包络调制系统，对于 PA 的非线性幅度压缩不敏感。所以一般 PA 本身造成的相位误差问题并不严重。我们需要保证的是 PA 的供电退耦和输入输出匹配就可以了。注意：对于 EDGE 模式下面的情况不是这样的。

另外，我们也得到这样的信息，有客户反馈在 PA 供电线上面或者控制信号上面，修改电容值，可以有效的改善相位误差。推测原因可能是有射频信号从 PA 泄漏出来，影响了发射链路。

## 26MHz oscillator 稳定性

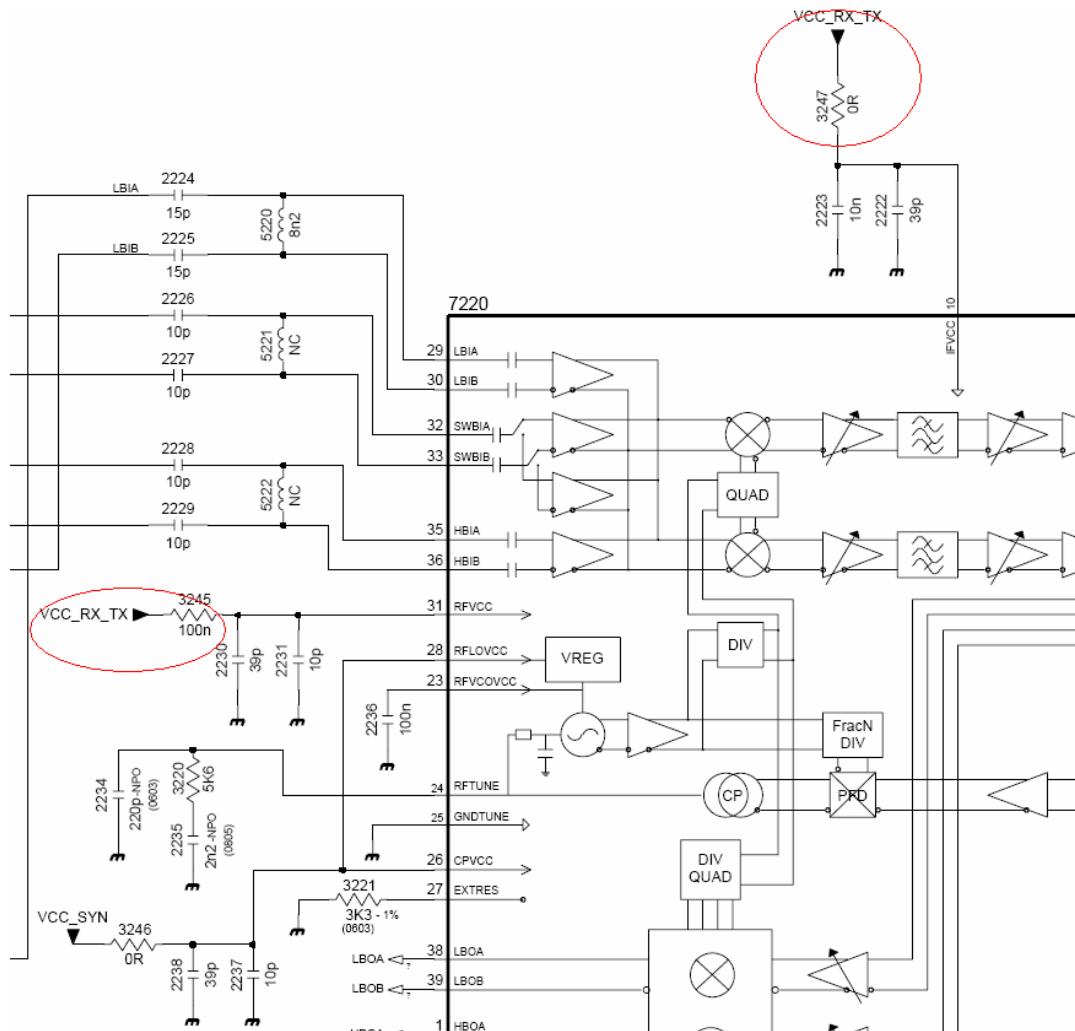
一般来说,26MHz oscillator 是整个手机的时钟基础，相当于人体的心脏。如果这个“心脏”工作不稳定，那么整个系统的调制精度肯定有问题。这个振荡电路对 power supply 的稳定性要求很高，一般都有一个专门的 LDO 来进行供电。

下面的建议供参考：

- 注意 Power supply 的退耦。
- 注意整个 PCBA 任何的 26MHz clock 都要和射频走线保证良好的隔离。特别是 PA 的输出信号线，有时候，仅仅一层地做隔离并不会太有效。
- 给 PA 供电的 Vbatt 走线必须远离振荡电路，并且和 26MHz clock 保证最好的隔离。曾经碰到过这样的情况，Vbatt 走线从 TCXO 下面穿过。尽管其中隔离了 2 层地，其中一层是主地，但是在调试过程中，相位误差依然乱的一团糟。
- 顺便说一下，Crystal 一般对温度变化很敏感，请远离 PA。

## Transceiver 供电线退耦问题

对于任何一个 Transceiver 来说，供电线的退耦都是非常重要的。



经常碰到问题的是 Vcc\_RX\_TX 这根供电线。在发射链路上面，Vcc\_RX\_TX 给发射的混频器供电。这个供电线对射频信号比较敏感，因为任何射频信号将会由此进入混频器进行调制，从而降低发射机的性能。

一般手机在高功率情况下，相位误差很差；在低功率情况下面，情况依然没有改善，那么有可能和这些供电线的退耦有关系。

用手触摸这个电容，或者尝试改变电容的值是一个很好的尝试。

### 调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
  - 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
  - 多用手触摸，多思考。
  - 从不断否定中找到正确答案。

## 相位误差的基本调试步骤

以上我们谈了一些相位误差问题的原因和一般调试方法，希望对大家有帮助。

可能大家会疑惑的是：为什么没有用仿真软件来加快我们分析问题的速度，克服电路上面的设计问题？

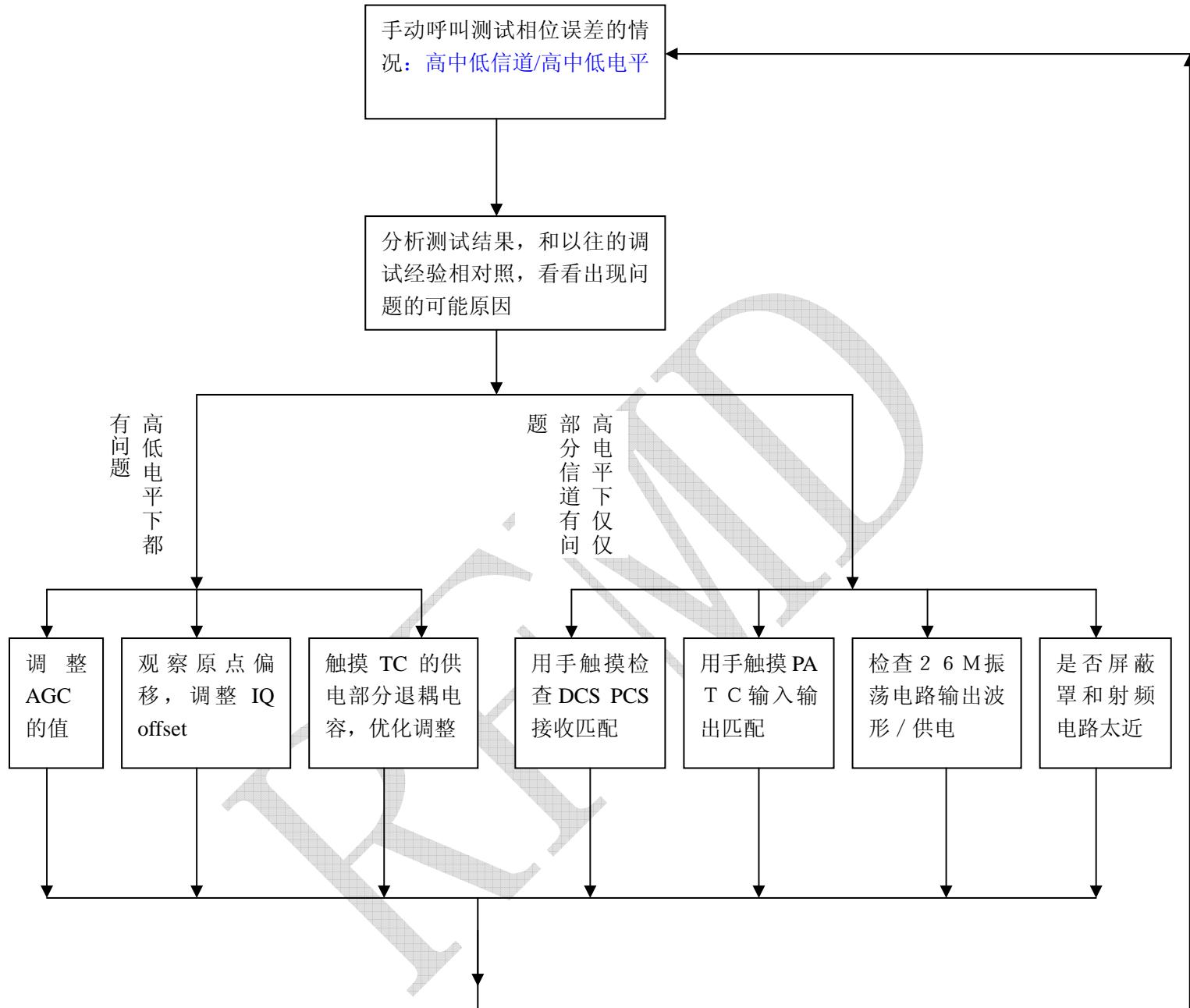
我的理解是：对于手机射频来说，熟练使用软件仿真固然会对工作很有帮助，但更重要的是对一些射频基本概念的深刻理解和掌握。

另外，射频新手经常碰到的问题是，拿到一块电路板，出现问题时候，不知道如何下手。我想有必要介绍一下调试步骤。供大家参考。



调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。



调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## 写在后面的话

写到这里，感觉实在是水平有限，很多问题无法详细的叙述清楚，无法进行深入细致的探讨。

希望能对大家的工作有一定的帮助，起到抛砖引玉的作用。

在此，感谢以前所有的射频同事（**Band of Brothers**）。这些经验的文字都是和大家一起讨论，测试，不断修正和积累才得到的。

## 参考文档

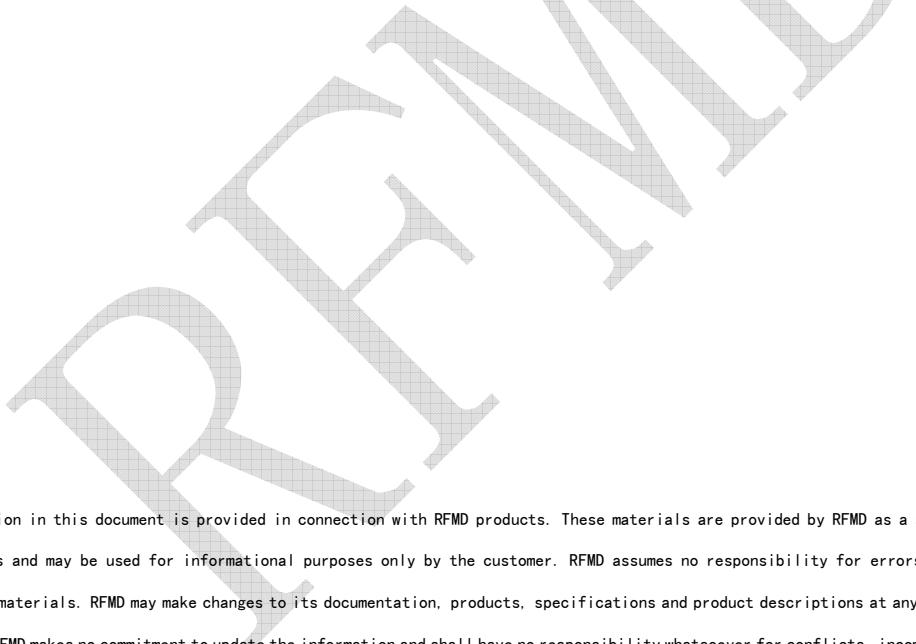
- RF3166 loadpull data RF3166E12-2-A\_032105.ppt
- Agilent Technologies Wireless Test Solutions Application Note 1313

调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## 版本管理

时间	状态	版本
2006-3-4	初稿完成	V1.0
2006-3-6	修改了一些文字错误	V1.1
2006-3-23	修改了一些文字错误	V1.2
2006-4-10	修改了一些文字	V1.3
2007-2-1	偶尔重新看了一遍。发现一些地方说明的不完善，增加了部分注释。	V1.4
2007-4-23	增加了参考文档部分，修改了 PS 名称为 NXP	V1.5
2007-4-28	删除了部分公司的信息	V1.6
2007-4-30	删除了引用的项目代码，并且增加了 PA 输出谐波调试部分。修改了部分插图。	V1.7



Information in this document is provided in connection with RFMD products. These materials are provided by RFMD as a service to its customers and may be used for informational purposes only by the customer. RFMD assumes no responsibility for errors or omissions in these materials. RFMD may make changes to its documentation, products, specifications and product descriptions at any time, without notice. RFMD makes no commitment to update the information and shall have no responsibility whatsoever for conflicts, incompatibilities, or other difficulties arising from future changes to its documentation, products, specifications and product descriptions. All diagrams and pictures used in this doc., come from network.

调试电路的基础原则：

- 多看 layout。
- 先考虑软件 TAT 参数修改，再考虑动烙铁和焊枪。
- 多用手触摸，多思考。
- 从不断否定中找到正确答案。

## 射 频 和 天 线 设 计 培 训 课 程 推 荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材；旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习，能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程，共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解，并多结合设计实例，由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS，迅速提升个人技术能力，把 ADS 真正应用到实际研发工作中去，成为 ADS 设计专家…



课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出, 是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装, 所有课程都由经验丰富的专家授课, 视频教学, 可以帮助您从零开始, 全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装, 还可超值赠送 3 个月免费学习答疑…



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线, 让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…



详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>