
EGSM 900MHz 移动通讯基站天线模块中互调失真的测量与控制

柳光福 刘启明 沈仁年

上海埃德电磁技术有限公司 (上海 200237)

摘要：本文从理论和实用两方面阐述了 EGSM 900MHz 移动基站中天线模块产生的三阶和五阶互调失真对移动通讯质量的影响；作者详细地叙述了在没有专用互调失真测试仪器的情况下，如何用通用的测量仪器、功率放大器和低互调失真的电缆构建高质量的测试系统，使之满足移动通讯基站中天线模块互调失真的测量要求；与同仁分享在设计和制造天线模块过程中控制互调失真的心得体会。

关键词：天线模块，合路器，双工器，三阶互调，五阶互调

Measuring and Controlling Intermodulation Distortions of Antenna Module within the EGSM 900MHz Mobile Communication Base Station

Liu, Guangfu, Liu, Qiming and Shen, Rennian,

AERODEV Electromagnetic Technology Inc. Shanghai 200237

Abstract: The third and fifth order intermodulation distortions of an antenna module within the EGSM 900MHz mobile communication base station and its impact on communication quality are analyzed from theory and investigated in practice. Relying on self-dependence, a measurement system of intermodulation distortions of an antenna module has been developed using general measurement instruments, power amplifiers and the cable that its intermodulation distortions' level is much lower than the requirements. It is proved that this measurement system operates as good as the commercial one. Measuring results from our developing samples of antenna modules are analyzed and improved until they have met the requirements of international standards of EGSM base station. Some experiences and techniques about controlling third and fifth order intermodulation distortions within antenna modules are sharing with whom interested in this field.

Key words: combiner, diplexer, antenna module, third order intermodulation distortion and fifth order intermodulation distortions

1 概述

移动通信在世界范围内得到空前的发展和應用。在短短的几年內，我国的移动电话用户就跃居世界之首，我国通信产业的发展和技术进步取得了举世瞩目的成就。

当前我国营运的移动通信是属于第二代或二代半的。由于工作原理的区别，他们分为 CDMA(即 C 网)和 GSM(即 G 网)两种体制。本文讨论的移动基站天线模块用于 G 网的移动基站。

G 网移动通信中的第二代基站设备和二代半的主要区别表现在二方面。首先，是工作频率范围不一样。在第二代的基站设备中，G 网的发射频率为 935-960MHz、接收频率为 880-905MHz，发射和接收的带宽都是 25MHz，在发射和接收之间有 30MHz 带宽的隔离。由于移动通讯用户的急剧增加和频率资源的十分紧缺，在大多数二代半的 G 网移动基站中，发射频率扩展为 925-960MHz、接收频率也相应地变为 880-915MHz，发射和接收的频率范围都增至 35MHz 的带宽，发射和接收之间的隔离带宽就只有 10MHz 了。这样一来，既充分利用了频率资源，又极大

地满足了移动用户的需求。为了区别二者的不同，把这种 35MHz 带宽的移动基站称为 EGSM 基站。其次，在第二代 G 网移动基站中，所用的合路器、双工器、低噪声放大器（LNA）和分路器，都是以单独部件的方式分布在基站的机柜内，他们的体积大，相互之间的连接电缆长。出于控制成本的考虑和技术的进步，在二代半的 G 网 EGSM 移动基站中，显著地减小了上述部件的体积、重量和连接电缆的长度，把上述几个部件十分紧凑地组合在一起，称之为天线模块。

图 1 就是一种 EGSM 900MHz 移动基站中天线模块的框图。它是这样工作的，根据移动通讯系统指令，基站在 $F_1(f_1)$ 和 $F_2(f_2)$ 的频点发射与移动用户终端（如手机）联系的功率信号。实际上，这两路信号就是连接的两个功率放大器的输出。在 f_1 和 f_2 经合路器后成为能能在一个端口上传输的功率信号，送到双工器的发射滤波器输入端口。在双工器发射滤波器的输出端口与天线连接之间，设置有定向耦合器。通过它检测在天线上正向传输的功率信号的幅值和从天线反射回来的信号幅值，并把这些信息送到移动通信系统的有关电路，诊断出双工器与天线的匹配状态。若处于严重失配，则终止 f_1 和 f_2 功率放大器的工作，并切断与天线模块的连接。

在此同时，移动通信基站中的天线模块要接收由移动终端用户（如手机）传来信号，因其强度远远低于 f_1 和 f_2 的信号电平，首先，经由双工器中的接收滤波器抑制其他干扰噪音，选出用户（如手机）传来信号，紧接着在双工器接收滤波器输出端的低噪声放大器（LNA）进行放大。把基站天线模块接收到的极其微弱的用户信号放大到移动通信系统要求的电平，然后经由与 LNA 输出端连接的功分器，一般分成四路，传送到有关的电路进行相关处理。

在上述的天线模块中，有如下两点要引起高度重视。

其一，在基站天线模块中传输射频大功率的条件下，要考虑其中的合路器、双工器，和与之相连接的电缆和射频连接器的非线性因数的影响，特别是它们的非线性因数产生的互调失真对通讯质量的影响。

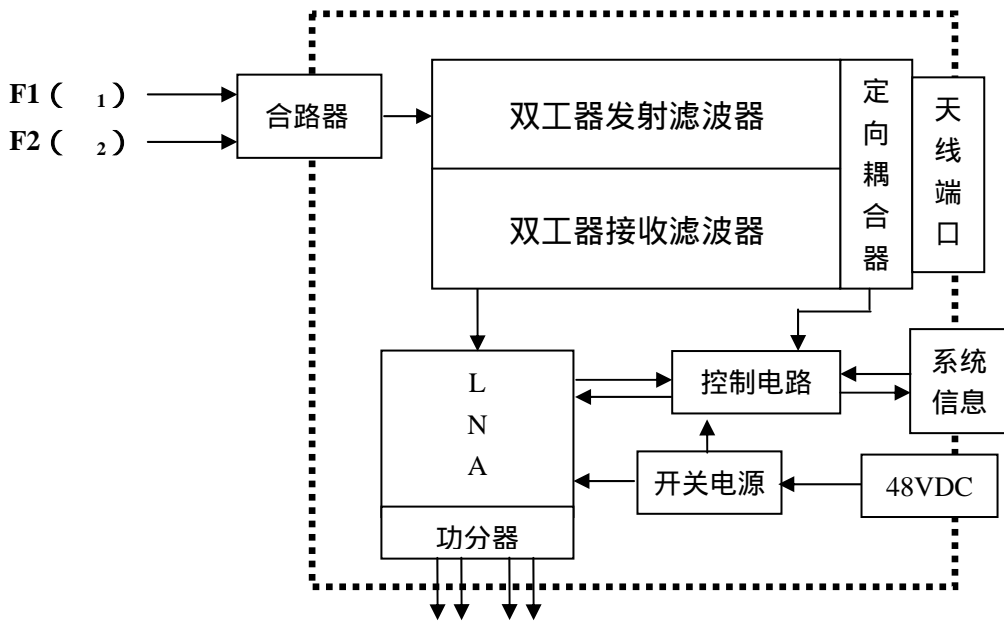


图 1 EGSM 900MHz 基站天线模块原理图

其二，在有二路(f_1 和 f_2)大功率射频信号(如在 EGSM 925-960MHz 范围内的发射信号)通过非线性的合路器、双工器、相关的电缆和连接器时，要产生互调失真(信号)，生出新频率的信号。其中幅度最大的三阶互调信号($2f_1 - f_2$)($2f_2 - f_1$)和五阶互调信号($3f_2 - 2f_1$)($3f_1 - 2f_2$)，要落入到 880-915MHz 的接收频率范围内。例如，图 1 中的 $F_1=930\text{MHz}$ ， $F_2=950\text{MHz}$ ，

这两个频点的大功率信号同时进入合路器，并经双工器和天线发射出去，则这传输过程中要生成 $(2\omega_1 - \omega_2)$ 的三阶互调信号，其频率为910MHz；同时生成 $(3\omega_1 - 2\omega_2)$ 的五阶互调信号，其频率为890MHz，这两个新频率的信号都要进入到双工器中925-960MHz的接收滤波器，并且在LNA得到放大，与从用户传来的信号混在一起。实际上，这些三阶互调和五阶互调信号就是噪音，当这些噪音的幅度大到一定的程度，就会使移动基站与用户（例如手机用户）联系的信号的接收和识别受到影响，引起通信质量的下降，如果三阶互调和五阶互调信号的幅度过大，以致淹没掉接收到的、来自用户的微弱信号，不能进行通信。为了深入认识互调失真的影响，下面我们介绍用信号理论的方法来要分析三阶互调和五阶互调失真的成因，记述我们根据现有实情况建立的天线模块互调失真的测试系统和控制它们，使之满足相关标准要求的措施和方法。

2 存在的三阶和五阶互调失真

当把天线模块中的合路器、双工器中的滤波器、连接电缆和连接器都视为四端网络，在假定它们是线性网络的前提下，那么它们的输入信号（用 V_{in} 表示）和输出信号（用 V_{out} 表示）可以表示为下面的线性关系，即：

$$V_{out}=AV_{in} \quad (1)$$

A是表示输入和输出变化（如幅度变化）的系数。

当把它们视为非线性四端网络时，输入输出的关系就变得复杂了，拟可用（2）式来表示，即

$$V_{out}=A_1V_{in}+A_2V_{in}^2+A_3V_{in}^3+\dots \quad (2)$$

其中的 A_1 、 A_2 和 A_3 是描述幅度变化的系数。

当该四端网络的输入只有一个单频信号，如 $V_{in}=\cos \omega t$ 的条件下，则在四端网络的输出中，会有 $\cos 2\omega t$ ， $\cos 3\omega t$的新频率信号的产生。因为 V_{in}^2 项中有 $\cos^2 \omega t$ 项，则

$$\cos^2 \omega t=1/2(1+\cos 2\omega t) \quad (3)$$

出现了 $\cos 2\omega t$ 项，它就是 $\cos \omega t$ 的2倍频信号。同样， V_{in}^3 项中有 $\cos^3 \omega t$ ，

$$\cos^3 \omega t=1/4(3\cos \omega t+\cos 3\omega t) \quad (4)$$

（4）式中的 $\cos 3\omega t$ 就是 $\cos \omega t$ 的三倍频信号。从（2）式中得知，还有四倍频、五倍频的信号。

大功率单频信号在非线性四端网络中产生的新频率会对图1中的天线模块产生影响，在本文中不作深入讨论。

但是当同时有两路不同频率的大功率信号加载到上述的非线性四端网络上时，即

$$V_{in}=a_1\cos \omega_1 t+a_2\cos \omega_2 t \quad (5)$$

情况会变得十分复杂。

把（5）式代入（2）式，这时的 $A_3V_{in}^3$ 项可以表示为

$$\begin{aligned} A_3V_{in}^3 &= A_3(a_1\cos \omega_1 t+a_2\cos \omega_2 t)^3 \\ &= 1/4 A_3 [a_1^3(3\cos \omega_1 t+\cos^3 \omega_1 t)+a_2^3(3\cos \omega_2 t+\cos^3 \omega_2 t)] \\ &\quad +3/2 A_3 [a_1 a_2^2 \cos \omega_1 t+a_1^2 a_2 \cos \omega_2 t] \\ &\quad +3/4 A_3 a_1 a_2^2 [\cos(\omega_1+2\omega_2)t+\cos(2\omega_2-\omega_1)t] \\ &\quad +3/4 A_3 a_1^2 a_2 [\cos(2\omega_1+\omega_2)t+\cos(2\omega_1-\omega_2)t] \end{aligned} \quad (6)$$

其中，我们最为关心的

$$\begin{aligned} V_{\text{三阶互调}} &= 3/4 A_3 a_1^2 a_2 \cos(2\omega_1 - \omega_2)t \\ &\quad +3/4 A_3 a_1 a_2^2 \cos(2\omega_2 - \omega_1)t \end{aligned} \quad (7)$$

称作三阶互调。

分析（7）式，可知

- 1) 如果 $a_1 = a_2$ ，则频率 $(2\omega_1 - \omega_2)$ 和 $(2\omega_2 - \omega_1)$ 的幅值相等。
- 2) 如果 $a_1 > a_2$ ，则 $(2\omega_1 - \omega_2)$ 的幅值大于 $(2\omega_2 - \omega_1)$ ，反之亦然；

3) 如果 f_1 的频率移动, f_2 的保持不变, 则 $(2f_1 - f_2)$ 的频移大于 $(2f_2 - f_1)$ 的频移;

4) 如果 $f_1 < f_2$, 则 $(2f_1 - f_2)$ 的互调失真邻近 f_1 , $(2f_2 - f_1)$ 的互调分量邻近 f_2 。

用相同的方法, 也可以分析五阶等互调的某些特点。

相对而言, 三阶和五阶互调失真的幅度比其他阶, 如七阶、九阶的互调失真的大很多, 故在 EGSM 900MHz 的相关标准中, 仅列出对三阶和五阶互调失真的要求。

3 EGSM 900MHz 基站对三阶和五阶互调失真的要求

从上面的分析知道, 在移动通讯基站天线模块中的接收通道内, 存在有三阶和五阶互调失真(即噪音信号)。要实现移动通讯基站与用户之间高质量的通信, 必须要把这个失真控制到允许的电平。为此, 在相应的 EGSM 900MHz 天线模块的技术文件中有详细的规定。如:

1) 在图 1 所示的天线模块中, 规定传送到合路器输入端口的 F1 和 F2 这两个频点信号的功率为 47.5dBm (56W) 时, 天线模块中的天线端口处测得 880-915MHz 接收频段内的三阶互调失真的电平要低于 -105dBm。

要测量上述互调失真的要求存在两方面的困难。其一, 如果严格按照上述要求, 在天线模块中的天线端口来实施这个测量, 则要在图 1 所示的天线端口上接入一个能承受 56W 的功率、三阶和五阶互调失真电平很低(例如三阶互调失真低于 -160dBc 以下)的定向耦合器和负载。但是, 通过 internet, 目前还没有查到能满足这样要求的定向耦合器; 其二, 假定有这样的一个 -20dB 的定向耦合器, 那么, 耦合出来加到频谱分析仪上的 F1 和 F2 的电平约为 27.5 dBm (0.563W), 两路(F1 和 F2)这样大的信号加到频谱分析仪的低噪音放大器(LNA)上, 同样要在频谱分析仪的低噪音放大器上产生三阶和五阶互调失真。由于这是在有源网络上生成的互调失真, 其互调失真电平比要测量的、在天线模块上产生的三阶和五阶互调失真电平要高很多, 从而使这样的测量失去意义。

当然, 也可以假定选 -50dB 的定向耦合器。这时, 上述在频谱分析仪的低噪音放大器上产生的三阶和五阶互调失真电平的问题可能缓解, 但是, 这时候在天线模块上产生的三阶和五阶互调失真电平要被衰减 50dB, 当他们到达频谱分析仪时已经十分微弱, 以致无法识别、无法测量。

为了避免上述问题的发生, 在 EGSM 900MHz 天线模块的技术文件又规定了另外的测量方法和互调失真电平, 即送到合路器输入端口的 F1 和 F2 这两个频点信号的功率为 47.5dBm(56W) 时, 把频谱分析仪连接到图 1 所示的 LNA 功分器的输出端进行测量, 这时在 880-915MHz 接收频段内的三阶互调失真电平要低于 -90dBm, 测得的五阶互调失真电平要低于 -115dBm。

因为 LNA 的输入端是紧接在双工器接收滤波器的输出端, 这个接收滤波器的输入端就是双工器的发射滤波器的输出端, 这里可视为图 1 中的天线端口。由于接收滤波器能把在发射滤波器中传输的两路(F1 和 F2)大功率信号衰减 90dB 以上。大大化解了两路(F1 和 F2)功率信号对频谱分析仪输入端低噪音放大器的影响。

上面述及的, 分别在天线端口和 LNA 输出端口的测量互调失真的方法, 都是国际标准“IEC 62037 (1999-09) RF Connectors, Connectors-Cable Assembly and Cable Intermodulation Level Measurement”推荐的测量方法。有的同行把在天线端口的测量方法称为互调失真的传输测量法, 把在 LNA 输出端口测量方法称为互调失真的反射测量法。对天线模块而言, 在 LNA 输出端口测量互调失真电平更符合实际情况。天线模块中的 LNA 的增益为 15dB 时, 把在图 1 所示 LNA 输出端口的功分器上测得的三阶互调失真电平 -90dBm 减去 15dB, 即为 -105dBm。与在天线端口的测量互调失真电平相吻合。

2) 关于控制三阶互调失真的另一个技术参数是: 在图 1 中所示天线端口处, (通过合路器) 输入两个 -43dBm 的(F1 和 F2)的频点信号, 当 LNA 的增益为 15dB 时, 在图 1 中所示 LNA 功分器输出端口上的测得的三阶互调失真的电平要低于 -80dBc。由于输入的两个频点信号(F1 和 F2) 电平仅为 -43dBm, 一般信号源的输出就能满足这个电平的要求, 比较容易实施和控制。

因此，本文不深入探讨。

4 三阶和五阶互调的测量

实际上，有专门的测量仪器来测量电缆、连接器、滤波器和其他无源器件的三阶和五阶互调失真的。由于很多原因和条件的限制，首先是这种专用的测试仪器的价格不菲，约为 18-20 万美元/台；其次，订货后的交付周期很长，要在 6 个月以上。可我们既未筹到这笔款，也不能等到 6 个月，所以只能自己动手，在可能的条件下搭建能满足上述要求的三阶和五阶互调失真测试系统。

按照“IEC 62037 (1999-09) RF Connectors, Connectors-Cable Assembly and Cable Intermodulation Level Measurement”的要领和我们的实际情况，我们搭建的测量系统原理框图示于图 2。图 2 中的粗虚线框图中的内容与图 1 是等同的，为了说明问题的方便，把一些与三阶和五阶互调失真测量不相干的内容作了简化，使之一目了然。

图 2 中的所用到的信号源和频谱分析仪，都是国际著名大公司的标准产品，它们的技术参数是能满足上面所述的三阶和五阶互调失真测试要求的。

关于图 2 中放大 F1 和 F2 的频点信号的功率放大器，是按 EGSM 900MHz 标准制造，用在移动基站中的功率放大器。要它们能输出 56W 的功率，一方面，在它们的输入端要配置低噪音的驱动放大器，因为这种功率放大器要求的驱动功率大于 23dBm，标准信号源的输出功率不能直接驱动到这个功率电平的，要增设前置放大器；另一方面，这种放大器在放大器输出 56W 的功率的时候，它们已不工作在线性区域，而是工作在接近饱和的区域，这时候的非线性失真较大，高次谐波的幅度大。但理论分析和我们的实际测量证明，它们对三阶和五阶互调失真的测试几乎没有影响。

不管是在天线模块的天线端口测量三阶互调失真电平，还是在 LAN 的输出端口来测量，最使我们为难的是，应该用什么样的负载接在图 1 所示的天线端口的连接器上，才能准确测量到我们要测得互调失真！因为在这种条件下的负载，必须要具有以下的能力；

A) 能承受近 60W 的连续功率，在此功率电平下性能稳定；

B) 在注入上面规定功率的条件下，其本身产生的三阶和五阶互调失真电平，必须低于对天线模块互调失真电平的要求。否则，会得到这样的结果，即所测得的三阶和五阶互调失真不是来自于被测的天线模块，而是来自于接在天线连接器上的负载的互调失真。

在经历了多次的努力、探索和失败后，我们最后采用的是 SUHBER 公司的 RG402、具有低三阶和五阶互调失真的射频电缆作为天线模块的负载。它长约 66 米，在 900MHz 处的插入损耗约为 30dB，功率处理能力大于 60W。经专用互调测量仪器的校验，在两路输入信号幅度为 43dBm 的时候，其三阶互调失真为 -168 dBc，这个电平低于天线模块中双工器的三阶和五阶互调失真的要求，能保证我们测得的三阶和五阶互调失真是由天线模块产生的，而不是接在天线端口上的电缆的。选用 SUHBER 公司的、具有低三阶和五阶互调失真的射频电缆作为测量互调失真的负载，对建立图 2 所示的互调失真测试系统，起了决定性的作用。

连接信号源和放大器，以及连接放大器和合路器之间的电缆和连接器，它们的三阶和五阶互调失真技术指标可以放宽，因为通过它们的功率信号是单个频点的。上面的分析指出，虽然它们对通过的单个频点的大功率也存在有非线性效应，会生成以单个频点频率的多次谐波失真。但是，它们都远离三阶和五阶互调失真的频率，对要测量的天线模块的三阶和五阶互调失真不会产生影响。这一点，在我们实际测量过程中得到证实。

在图 2 中的每只功率放大器的输出与合路器的两个输入端口之间，分别插入两只 -50dB 的定向耦合器。它们的 -50dB 输出端口再分别连接到一个合路器的两个输入端口上。从连接在合路器输出端口的频谱仪上读出数据，加上电缆、合路器和定向耦合器的损耗，就是功率放大器的输出电平。在此述及的连接器、合路器和有关连接电缆的三阶和五阶互调失真的要求可以放宽，它们不影响互调失真的测量。

从图 2 中的频谱仪 是连接到图 1 中 LNA 的功分器的输出端口上，直接读出的就是天线模块的三阶或五阶互调失真电平。

为了验证图 2 所示测试系统的可信度，曾把我们研制的 EGSM 900MHz 移动基站天线模块样品和某国际著名公司验收合格的上机产品在图 2 所示的系统中测量，把测得的结果进行对比，部分典型数据见表 1。

表 1 上海埃德的样品和某国际著名公司验收合格的上机产品互调失真电平对比

试验条件	图 2 中的 $F_1=930\text{MHz}$ $F_2=950\text{MHz}$ 在频谱分析仪 上显示 F_1 和 F_2 的电平为 47.5dBm 。			
测得数据对比	三阶互调 (910MHz)		五阶互调 (890MHz)	
	上海埃德样品	某国际著名公司验收合格的上机产品	上海埃德样品	某国际著名公司验收合格的上机产品
	-114.0dBm	-117.5 dBm	-127.5dBm	-125.5dBm
	见图 3	见图 4	见图 5	见图 6
结论	满足 EGSM 900MHz 移动基站天线模块对三阶、五阶互调的要求			

验证数据证明，图 2 配置的测试系统测得的数据是可信的。

图 2 所示测量系统被验证能满足天线模块三阶和五阶互调失真的测试后，对我们研制的多只天线模块样品进行了大量的、反复的互调失真测量和数据分析，一步一步地摸索和总结控制互调失真的经验，不断改进和完善有关的设计、加工工艺和电镀工艺。功夫不负有心人，在坚持不懈的努力下，我们百折不回，终于使我们研制的天线模块的三阶和五阶互调失真电平满足 EGSM 900MHz 移动基站相关国际标准的要求，且尚有余量。

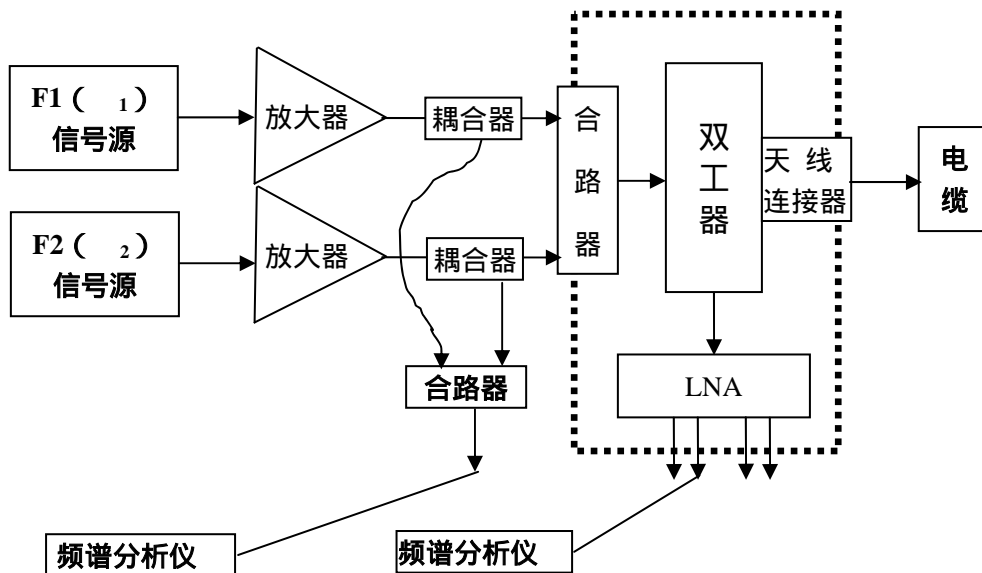


图 2 三阶和五阶互调信号的测试框图

在一步一步地改善天线模块三阶和五阶互调失真的过程中 我们体会到在很多文献中述及的、关于控制三阶和五阶互调失真的经验对天线模块的设计和工艺是有指导意义的，如

- A) 在存在有两个大功率射频信号的部位，不要用钢、铁镍合金、镍和类似的材料；
- B) 不同的材料连接到一起后，可能发生非线性的整流效应；
- C) 相同材料的连接，其氧化层之间也存在非线性效应，如铜的氧化物，虽然很薄，但它

就是 P 型半导体，会引起互调失真增大；

除上述很多文章述及的控制互调失真的措施外，我们认为，

- D) 如果双工器是用铝制造，镀银之前的打底电镀层不能用镍。虽然镍的附着力好，但是，镍属于上面 A) 列出的禁用材料；
- E) 电镀层的厚度要满足设计要求；如镀的铜和镀的银的厚度都要在 7-10 μ 范围内；
- F) 加工工艺要到位，不能有毛刺；两个面的相交之处要圆滑；
- G) 凡是有两个（或多个）不同频率的大功率信号要通过的电缆和连接器，都要能满足系统对三阶和五阶互调失真的要求等等。

5 尾声

在上面的分析中指出，两个（或多个）不同频率的大功率信号通过无源微波器件，如合路器、滤波器、连接器和电缆的时候，会生成新频率的三阶和五阶互调失真信号。例如在 EGSM 900MHz 的天线模块中，发射机工作在 925-960MHz 的两个频点所产生的三阶和五阶互调失真信号就会混杂在接收机工作的 925-960MHz 频率范围内，严重影响到移动通信基站与用户通信的质量。因此，把有关的三阶和五阶互调失真控制到系统规定的电平之内是必须的。在测量三阶和五阶互调失真电平的实践中我们发现，如果天线模块中的合路器、滤波器、连接器和连接电缆的三阶和五阶互调失真电平不能满足系统的要求，在接收频率范围内产生的互调失真电平就会远大于基站与用户之间进行通信的信号电平，就不能保证通信质量，甚至不能通讯。所以，把在移动通讯基站的天线模块内的互调失真控制在标准允许的电平意义重大，当然，正确测量天线模块的互调失真就显得十分重要。

我们在构建图 2 所示的天线模块三阶和五阶的互调失真的测量系统时，抓住产生互调失真的条件和关键部件，选用 SUHBER 的低互调失真电缆作为负载。因为它的互调失真电平低于 -165dBc 以下，把它作为负载接到天线模块的天线连接器上，使得在图 2 所示的这个测量系统内测得的互调失真是天线模块内的双工滤波器、连接器和连接电缆产生的，与接在天线连接器上的负载无关，保证了我们搭建的图 2 的测量系统的可信度，从而为我们研发 EGSM 900MHz 天线模块，使它们的互调失真满足标准要求奠定了坚实的基础。

事实上，我们是在经历了许多失败和挫折，在总结教训和在同行的启发下，才找到用低互调失真电缆作为图 2 中测量系统负载的。上面总结的关于控制天线模块互调失真的方法，我们在有关的文献中已多次读到。但是，对文献中述及的材料、加工工艺和电镀工艺的认识也是在失败、试验和不断总结经验的实践中一步一步认识深刻的。其实，就这短短几行字，我们却为之付出了高昂的代价，在此无保留地与同行分享。

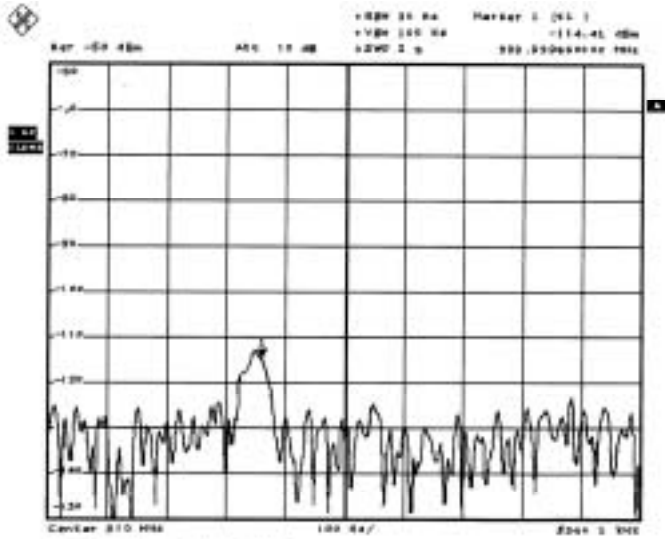


图 1 基站接收信号功率谱密度图

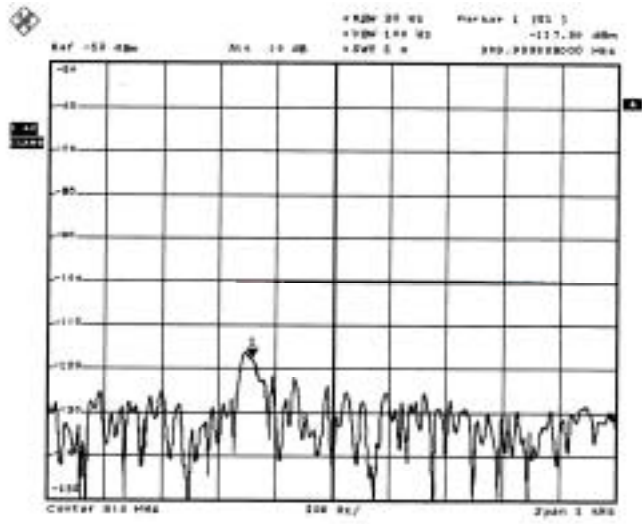


图 2 基站接收信号功率谱密度图

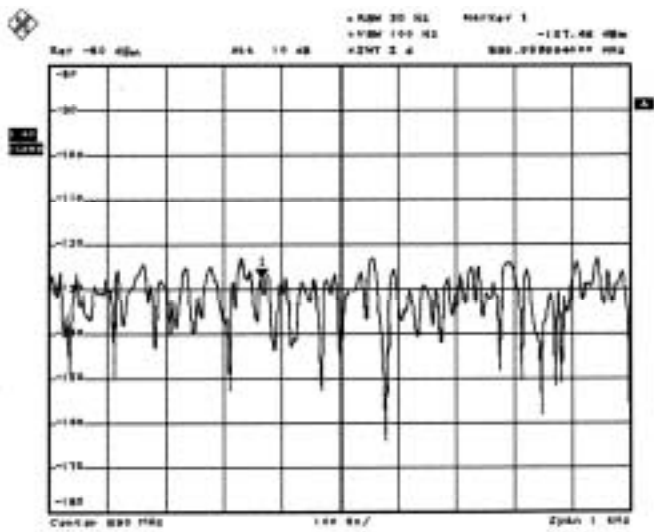


图 3 基站接收信号功率谱密度图

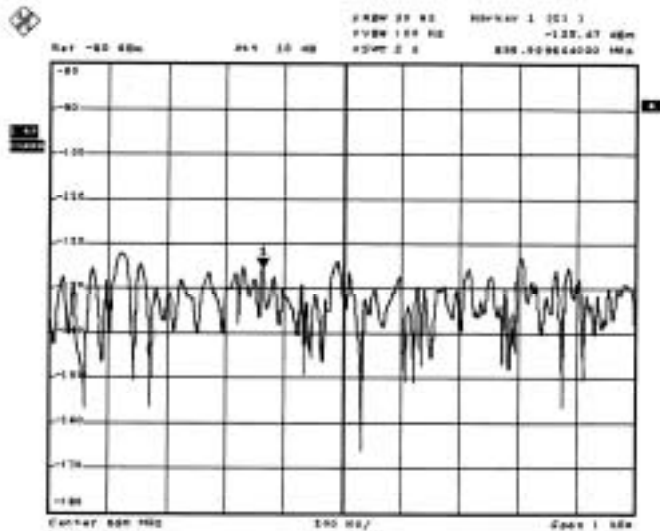


图4 上海埃德电磁技术有限公司产品的占空比图

参考文献

- 1) 柳光福, 刘启明, “双工器的频率温度系数”, 《航空电子技术》, 第 37 卷, 2006 年第 1 期;
- 2) Reimer Nagel, Karl Audenaerde, “Passive Intermodulation in Duplexed Communication Systems”, 《Theory and Measurement, Automated RF and Microwave Measurement Society (ARMMS) 》, 22nd Conference Digest, Windermere, Cumbria, U.K., Nov. 16-17, 2004;
- 3) IEC 62037 First Edition (1999-09), “RF Connectors, Connector-Cable Assemblies, and Cables - Intermodulation Level measurement”;
- 4) 凤卫锋, “通信系统中无源互调失真的测量”, 《人民邮电报》, 2006 年 6 月 5 日;
- 5) 朱辉, “浅谈 WCDMA 发射频段无源互调失真的测量”, 《通信世界》, 2005 年 7 月;
- 6) David Weinstein, “Passive Intermodulation Distortion in Connectors, Cable and Cable Assemblies”, 《Microwaves & RF》, March, 2001.

「作者简介」

柳光福 (1944—), 男, 上海埃德电磁技术有限公司总工程师、研究员。1967 年毕业于成都电讯工程学院。主要从事电磁干扰控制器件、移动通讯天线模块的研究与制造。

刘启明 (1941—), 男, 上海埃德电磁技术有限公司高级工程师。1967 年毕业于大连工学院。主要从事电磁干扰控制器件、移动通讯天线模块的研究与制造。

沈仁年 (1950—), 男, 上海埃德电磁技术有限公司高级工程师。1982 年毕业于上海科技大学。主要从事电磁干扰控制器件、移动通讯天线模块的研究与制造。