

移动基站天线模块中 LNA 的噪音系数和电磁干扰控制

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：本文介绍了 EGSM 移动基站天线模块中 LNA (低噪声放大器) 的一种设计方案；在 LNA 的研发过程中发现，由于所处的电磁环境，LNA 在与天线模块进行信号交联过程中遭遇到了电磁干扰的影响，致使 LNA 的噪音系数不满足系统的要求；本文详实地纪录了通过理论分析和实验，一步一步深入地认识到相关的电磁干扰源、干扰信号和其耦合路径与 LNA 噪音系数的联系，以及控制这些电磁干扰的办法，最终满足了系统的要求。事实也说明了，即使在微波电路中，控制电磁干扰信号的设计也不能掉以轻心。

关键词：电磁干扰，LNA，噪音系数，天线模块，双工器，合路器，功分器，

1 概述

无论是 C 网还是 G 网的移动通讯基站，不管该移动通讯基站是在频分制还是时分制下运行，其中的 LNA 都是十分关键的部件，它的噪音系数的优劣直接关系到移动通讯的质量。

图 1 是 EGSM 移动通讯基站中称之为天线模块的原理图¹⁾。它由合路器、双工器、LNA、定向耦合器、系统控制电路和向它们供电的开关电源等组成。其工作原理是这样的，根据系统指令，设定的频点 F_1 和 F_2 是基站与移动用户终端 (如手机) 联系的功率发射信号，这两路信号经合路器后成为能在一个端口上传输的信号，送到双工器的发射滤波器端口。在双工器发射滤波器的输出端口与辐射天线连接端口之间，设置有定向耦合器。它要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，并把这些信息送到系统有关的电路，诊断出双工器与天线的匹配状态，然后系统决定 F_1 和 F_2 功率放大器的工作状态。若测得天线与双工器连接端口处的 VSWR 小于系统设定的门限值，则系统发指令使频点 F_1 和 F_2 的功率放大器正常运行；反之，若测得的 VSWR 大于系统设定的门限值，这意味着功率发射信号传输路径不畅，则系统把频点 F_1 和 F_2 的功率放大器关闭，以防其损坏，待系统排除有关的故障后再行接入运行。

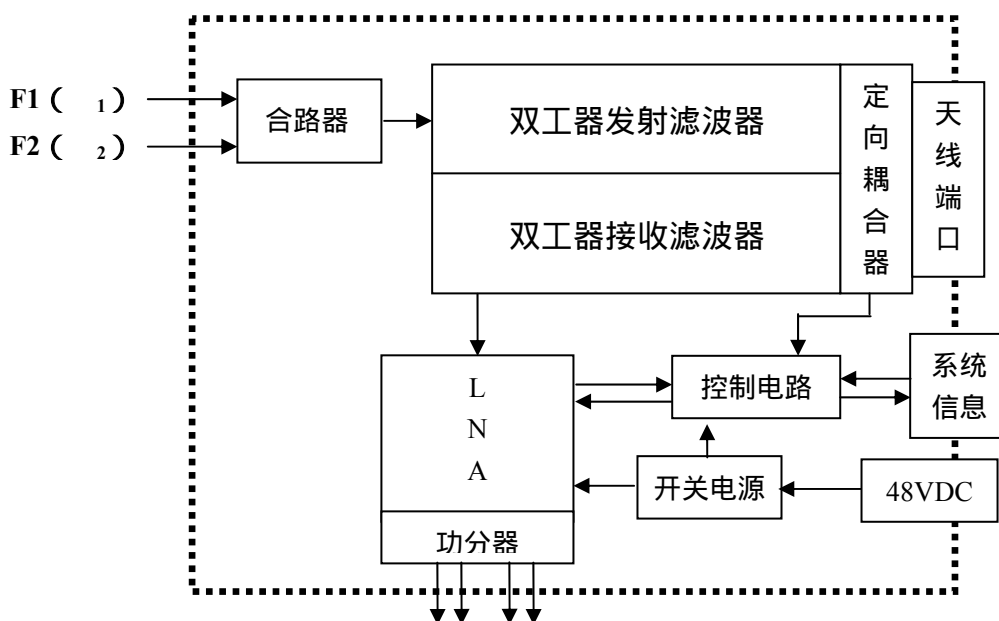


图 1 EGSM 基站天线模块原理图

在此同时，基站天线接收到由移动终端用户 (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选出用户的信号。紧接着在双工器接收滤波器后面的 LNA 进行放大。系统要求这个 LNA 有固定的增益，它的噪音系数低，线性好，动态范围大。能把基站天线接收到的极其微弱的用户信号放大到系统要求的电平，然后，经由与 LNA 输出端连接的功分器，传送到系统有关的电路进行相关处理。

除了要把来自用户的极其微弱的信号放大到规定的电平外，还有一些系统功能要求在 LNA 电路内完成。由图 2 中看到，首先，LNA 放大器内要设置报警电路，输出报警信号，把 LNA 的工作状态是否正常告知系统，系统根据其工作状态采取对策；其次，根据系统的不同配置，要对 LNA 的增益进行调整，在一定的条件下，系统要改变 LNA 的增益，要求 LNA 的增益减少 4dB，以适应系统的要求；第三，系统要介入一个高电平的传输来检查 LNA 后面功分器是否与相关电缆可靠连接，确保系统可靠运行。第四，要按系统要求，在 LNA 的单元内安置一只黄色 LED 和一只双色 LED（含黄色和红色），根据系统传来的信号，它们显示不同颜色的组合来给出系统运行的信息。

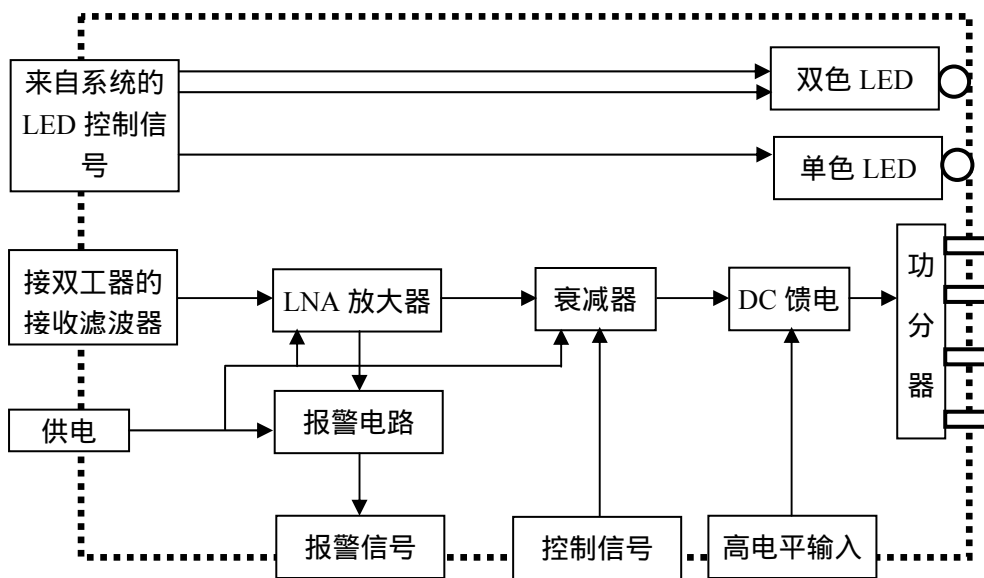


图 2 LNA 及相关信息框图

2 LNA 的主要参数和设计要点

根据系统的要求，可以把系统对 LNA 的要求用下面的主要技术参数表示：

- 1) 工作频率：880-915 MHz；
- 2) 阻抗：50 欧姆；
- 3) 功率增益： $20 \pm 1\text{dB}$ ；收到系统控制信号后，在信号传输的路径上插入 4dB 衰减，这时的功率增益变为 $16 \pm 1\text{dB}$ ；
- 4) 噪声系数：在低于 25 时，小于 1.3dB；
- 5) 1dB 压缩点输入功率：大于 -10dBm；
- 6) 三阶截点（IIP3）的输入功率：大于 0dBm；
- 7) 所有端口的电压驻波比：优于 1.3；
- 8) 电源和控制信号的连接：用超小型 2×6 连接器（定义为 A 和 B 两排）与 12 芯的扁平电缆连接来实现。各个脚的的定义见表 1，

表 1 电源和控制信号的连接器和相应电缆的定义

A 排	A1	A2	A3	A4	A5	A6
信号	地	地	高电平	放大器性能下降	单色 LED 为黄色	双色 LED 为黄色
B 排	B1	B2	B3	B4	B5	B6
信号	+12V	+12V	+5V	放大器失效	双色 LED 为红色	放大器衰减 4dB

由于系统要求提供 LNA 放大器的性能降低和失效的信息，这样一来，该 LNA 设计成图 3 的电路程式。即通过功分器和合路器的组合，用两路放大器 A 和 B 来实现其规定的增益。这种电路也提高了放大器的可靠性，当一路放大器失效时，该放大器的功率减小 3dB，向系统提供放大器性能下降的信息。只有当两路放大器同时失效，才向系统显示放大器失效。同时处理来自放大器 A 和 B 的状态监视信息，向系统提供报警信号。图 3 电路中输入端的功分器和输出端的合路器均可采用三分贝耦合器来实现，如 Anaran 公司的 Xinger Model XC0900A 的三分贝耦合器，其主要技术参数为

- 1) 频率范围：811-1000MHz
- 2) 最小隔离度：23dB
- 3) 最大插入损耗：0.15dB
- 4) 最大驻波比：1.15
- 5) 尺寸：14：22×8.89×1.75mm³

这个三分贝耦合器具有频率范围宽，插入损耗低，隔离度不错，尺寸小巧的优点，是实现 LNA 要求的好器件。

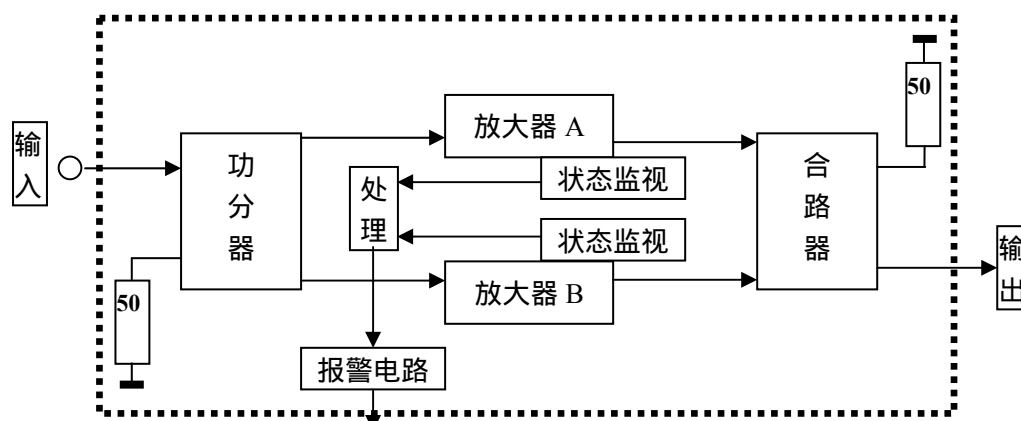


图 3 实现 LNA 的原理图

图 3 电路程式的另一优点是，当功分器的输出阻抗与放大器 A 和放大器 B 的输入阻抗因匹配不好而产生较大的反射时，反射功率仅会消耗在功分器连接的 50Ω 电阻上，不会影响 LNA 输入端口的匹配和稳定工作。

由于系统要求放大器的功率增益为 $20 \pm 1\text{dB}$ ，放大器 A 和放大器 B 拟由二级放大器组成，其中，第一级采用 Agilen 公司 ATF-54143 PHEMT 的四引脚塑封低噪音晶体管，该器件的特点是高增益，低噪音系数，高的 IIP3 截点；第二级采用其他线性好、动态范围大的器件便可。

按照上述设计要求，我们如期完成了 LNA 的设计和样品研制。整个图 2 所示的分系统被安排在一块四层印刷板上（即 LNA 印制板）。除少数几根连线外，LNA 输出端连接的功分器电路被布置在四层印制板的第三和第四面上，不与其它电路搞在一起，避免功分器受其他电路的影响。其余电路被安置在印刷板的第一面和第二面上，所有的有源和无源元器件都布置在第一面上。分别在第一面和第二面上、第三和第四面上，按电路要求设置孔金属化的地线连接。当然，也在第一第二面和第三第四面的四层印制板之间设置有孔金属化的地线连接，以满足信号交联和控制杂散电磁场的需要。

3 LNA 的安置和周边情况

图 4 展示了 LNA 印制板的具体安放位置、信号互联与周边布置的框图。整个 LAN 印制板是放置在双工器背面的一个深 15mm 的屏蔽盒内，使 LAN 印制板能可靠地运行。图中还示出了内部的电路安排，LNA 的输入端就是功分器的输入端，它十分靠近双工器接收滤波器的输出端，是用同轴电缆把它们连在一起的；LNA 的四个输出端子和两只 LED 发光二极管的大致安放位置如图所示。

同在双工器背面、位于 LNA 屏蔽盒的左下方，安置着没有屏蔽的、图 1 中所示的系统控制电路印制板和 PWM 开关电源印制板。这块系统控制印制板包括了图 2 中所示的、要送到 LNA 印制板的 LED 控制信号、从输 LNA 印制板传过来的报警信号、送到 LNA 印制板上的 4dB 衰减器控制信号和输入的高电平信号，PWM 开关电源印制板被安置在系统控制电路印制板的上面，在图中还示出了电路中有关 IC 和晶振的大致位置。

上面所述系统控制电路、供电和与 LNA 间信号传输，是靠 12 线扁平电缆和相关连接器来实现的。为了保护所传输的信号免受外部电磁干扰信号的影响，在这 12 线的扁平电缆的外面包有一层导电布，而且在工艺上保证，当 LNA 屏蔽盒的盖板装上时，屏蔽布被盖板压住，二者之间有很好的电气连接。

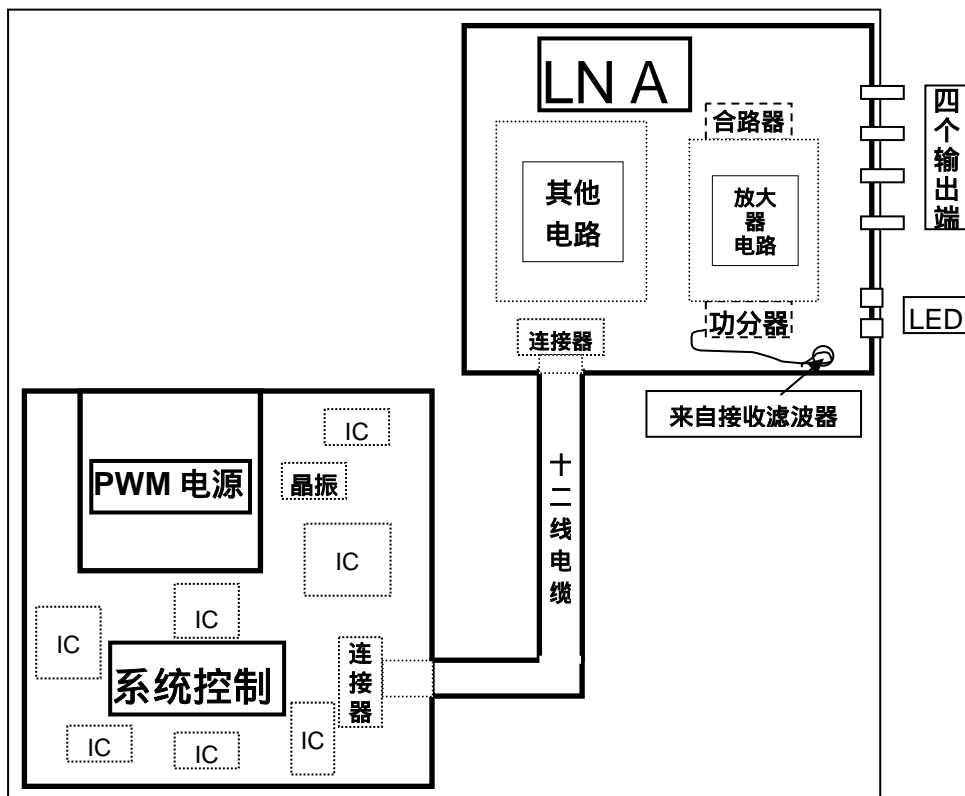


图 4 LNA 和周边环境

电磁兼容性原理指出，在系统控制 和 PWM 开关电源的印制板上，既有 48V 变换到 12V 和 5V 的开关电源，又有晶振和 IC 电路等等。总之，这块印制板上的电路都是在运行着上升沿和下降沿十分陡峭的脉冲信号。大家知道，脉冲信号的前后沿总是有一定的上升和下降时间。为方便分析，假定上升和下降时间相等，脉冲信号可以简化为等腰梯形，如图 5 右上角所示的那样。

按照福里衰级数的分析方法，可以算出其各次谐波的幅度为²⁾：

$$V_n = 2V \frac{1}{T} \left(\frac{\sin \frac{n}{T} t_r}{\frac{n}{T} t_r} \right) \left(\frac{\sin \frac{n}{T} T}{\frac{n}{T}} \right) \quad (1)$$

式中： $V_n = n$ 次谐波的幅值， $V, n=1, 2, 3, \dots, n$ ；
 V = 脉冲的幅值， V ；
 t_r = 脉冲上升和下降的时间， s ；
 τ = 脉冲宽度， s ；
 T = 周期， s 。

在一定的重复频率下的其各次谐波幅度的包络如图 5 所示。

由于在图 4 电路中，有 48V 变换为 5V 和 12V 的 PWM 开关电源，它们在变换过程中的脉冲信号幅度较大；另一方面，控制电路的脉冲信号幅度在 5V 之内，但是，其脉冲宽度很小，即周期很短，重复频率高。自然，由此产生的各次谐波幅度仍会很高。这样一来，由 (1) 式估算出的高次谐波，直到移动通讯的频率范围 (900MHz 和 1800MHz)，与 LNA 要放大的微弱信号，其幅度仍然是相当可观的。这些谐波会经由在导线上的传输和空间的辐射，去影响其他电路的正常运行。从电磁兼容性 (EMC) 的观点来分析，它就是一个必须认真对待、严加控制的干扰源。虽然把 LNA 放到屏蔽性能完好的屏蔽盒内，在 12 线扁平电缆的外面包了屏蔽布，这层屏蔽布和屏蔽盒有良好的电连接。但是，在我们下面的实验和分析中，事实证明要把电磁干扰信号控制到允许得电平，实现图 4 分系统的电磁兼容性不是容易的事，为此付出了高昂的代价。

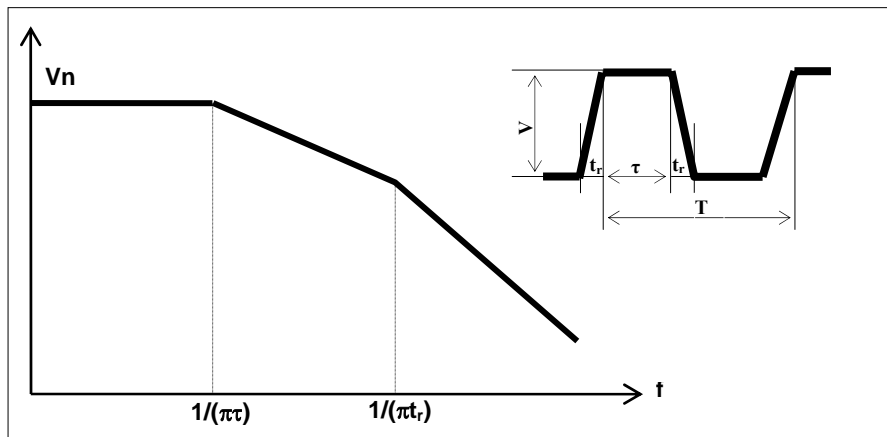


图 5 脉冲信号及其谐波包络

4 控制 LNA 电磁干扰三步曲

第一步曲：

完成 LNA 印制板的设计并制作出来后，在实验室测试它的参数和其他功能，得到的数据表明 LNA 设计达到预定要求，噪音系数等参数度优于系统规定的极限值。然后，把 LNA 印制板安装到图 4 所示位置，用 12 线扁平电缆把 LNA 与开关电源和系统控制电路连接起来，使用图 4 中的 PWM 开关电源供电，与系统控制信号发生交联，按系统规定的测试方法测量在天线模块中运行的 LNA 的噪音系数。反复试验得到的结果把我们惊呆了，原来在实验室测得的噪声系数都在 $1 \pm 0.15\text{dB}$ ，现在却增大到 3-5dB，大到难以使人置信的程度。在事实面前，我们冷静地、客观地、仔细地分析，事实教育了我们：实际上，LNA 在实验室的测试和安装在图 4 所示的天线模块中的测试，其电磁环境完全不同，所以得到截然两样的结果。用电磁兼容性理论来分析，当 LNA 安装到图 4 所示位置后，开关电源和系统控制电路的印制板上产生的电磁干扰信号通过传导（从导线）和辐射（从空间）影响到 LNA 的正常运行，在 LNA 的噪音系数方面表现最为明显。为此，我们作了力所能及的调查，进行了认真的、实事求是的分析。

1) 把 HP11940A 近场探头 (30MHz-1GHz) 放在图 4 中的 点的位置。把频谱仪的识别带宽和视频带宽都设置为 100kHz。这是根据 ETSI EN301087 V8.2.1，即“Digital cellular telecommunications system (phase 2 & phase 2t); Base station system (Bss) equipment specification, Radio aspects”中，

6.6 节 “spurious emissions from the transmitter antenna connector” 的规定设置的。测得在 880-915MHz 的范围内的电磁干扰信号电平为 16-18dB μ V。

2) 如图 4 中 LNA 印制板 所示的位置上,用频谱仪输入探头来测量通过 12 线扁平电缆中的+12V 和+5V 供电线在 LNA 印制板上接点处的噪音信号电平。这时频谱仪的设置与上述相同。在 880-915MHz 的范围内,其电平约为 21-26dB μ V。在 880MHz 的邻近范围内,其幅度高达近 40dB μ V。这是通过导线传到 LNA 印制板上的干扰信号电平,它既要加载到所有+12V 和+5V 有关的电路上,还要通过空间辐射,对 LNA 的正常工作构成威胁。

这里揭示的,大楷就是为什么 LNA 在实验室里运行正常,但是,安装到图 4 所示的天线模块内,使用天线模块提供的电源,要和系统进行信号交联,在此特定的电磁环境内,导线传来的和由空间耦合过来的电磁干扰信号破坏了 LNA 的稳定运行,以致 LNA 的噪音系数被恶化如此的程度!不把相关的电磁干扰信号控制到允许的范围内,LNA 的正常运行是不可能的。

由于要求在规定的节点时间内解决这个问题。我们在 12 线扁平电缆接入 LNA 印制板的屏蔽盒入口处,设置了一只 12 芯(即有 12 个端口)的穿芯滤波器。12 线扁平电缆先要连接在 12 芯穿芯滤波器的输入端,穿芯滤波器的输出连接到 LNA 印制板上的有关连接点。该穿芯滤波器的屏蔽外壳和 LNA 印制板的屏蔽盒有良好的电连接,

这个 12 芯穿芯滤波器就是一组低通滤波器,它除了通过电源和控制信号外,能衰减高频、直至微波的噪音信号。首先,它可以实现对+12V 和+5V 电源线和其它控制线上的传导干扰电平进行控制。其次,这 12 芯穿芯滤波器的安装利用了 LNA 屏蔽盒的屏蔽,使 12 线扁平电缆不再直接进入 LNA 的屏蔽盒内³⁾,从而把因 12 线扁平电缆上的电磁干扰信号从空间去影响 LNA 的工作的可能控制到最低程度。在这个办法实施后,测得的噪音系数在 880-915MHz 均小于 1.3dB,满足系统要求。

第二步曲:

12 芯穿芯滤波器虽然控制了电磁干扰,但是,这个办法不满足生产、装配和维修的要求。因此,要求把 12 芯穿芯滤波器的功能用其他办法来实现。

在重新设计的 LNA 印制板上,当 12 线扁平电缆到 LNA 印制板里的超小型连接器后,在每根电源线、信号线和控制线和地线之间安装一只适用于微波电路的、表面安装结构的陶瓷三端子滤波器。这种三端子滤波器,实际上是两端为电感,中间有一电容器接地的低通滤波器。按使用情况,在 800-960MHz 测得的插入损耗为 30dB 左右。

重新设计的 LNA 印制板在试验室的测试满足有关的要求后,再放入天线模块 LNA 的屏蔽盒内进行试验,测试结果表明,它的噪音系数在 3dB 左右,有所改善,但仍不能满足系统要求。

在进行电磁干扰控制,使噪音系数满足系统要求的试验中发现:

1) 剪去 12 线扁平电缆与 LNA 印制板连接的超小型连接器,直接把 12 根线焊接到每个三端子滤波器的输入端,在这种情况下测得的噪音系数能满足要求;

2) 12 线扁平电缆仍通过超小型连接器连接到 LNA 印制板上,但是,增加 IC 电源的退耦;完善 LNA 印制板上有关的接地走线;在图 4 中的 位置,即位于 LNA 印制板的超小型连接器和 LNA 输入端之间加一屏蔽,把 LNA 输入电路部分保护起来,其测得的噪音系数也满足系统的要求。

在上述控制电磁干扰的试验中,我们注意到 LNA 印制板上二只 LED 管控制信号的三根走线。在这次设计的 LNA 印制板上,这三根走线被安排在四层印制板的第二层上。这样一来,这三根走线与在印制板第一层的 LNA 输入端走线间有交叉,也就是说,存在有电磁耦合路径⁴⁾,虽然来自 12 线扁平电缆的这三根走线都接有三端子滤波器,但是,还没有把电磁干扰信号的电平控制到允许的程度,仍然有可能使 LED 三根走线上的干扰信号耦合到 LNA 的输入端。这是改版后 LNA 印制板设计的一个明显的失误。按上述测量干扰信号的方法,在 880-915MHz 的范围内测得 LED 管的接线处的干扰信号电平约为 15-18dB μ V,这是在今后的设计中一定要改进的地方。

第三步曲:

把上述试验证明了是控制电磁干扰行之有效的办法和 LNA 印制板上走线要关注的地方,在再次重新

设计的 LNA 印制板时体现出来。例如，把超小型连接器到 2 只 LED 管的三根控制信号走线布置在第四层印制板上，把 LED 走线与 LNA 的输入电路之间的耦合控制到最小；改进每块 IC 和相应去耦电路的接地点位置；改进去耦电路的设计；进一步优化各层印制板之间的孔金属化和接地，等等。这样一来，重新设计制作的 LNA 在实验室达到要求后，安装在实际应用的位置测试，都能满足天线模块有关参数的要求，在现场的实际使用获得满意的效果。

6 结论

回顾这次设计天线模块中的 LNA 所走过里程，从开始设计 LNA 印制板，到试验室测试满足指定技术参数的要求，这仅是我们为达到目标迈出的一小步。从实验室里研发的样品到能满足实际使用的样品，我们经历了较多的磨难，碰到一些目前书本上、软件中还难以找到现成答案的问题。本文中把控制 LNA 电磁干扰对噪音系数的影响总结为三步曲，实际上我们经历的远比三步曲描述的多得多。我们每认识到一种特定条件下的电磁干扰信号对 LNA 的噪音系数的影响，我们所采取的每一个控制电磁干扰的得当措施，都付出沉重的代价。我们体会到，有了十分优秀的器件和电路，以至用高级软件工具得到设计和满意的模拟结果，这是我们设计电路、设备、分系统和系统要关注的，但是还远不够。还要能估计出实际应用可能遇到的电磁环境，合理应用控制电磁干扰的设计，才可能会少走些弯路，提高效率。事实证明，用电磁兼容性原理来分析问题，选用合适的控制电磁干扰的办法来解决来控制可能存在的电磁干扰，在电子电路、电子设备、电子分系统和系统的设计、制造和工程实现中显得越来越重要。

参考文献

- 1) 柳光福，刘启明，沈仁年，“EGSM 900MHz 移动通讯基站天线模块中互调失真的测量与控制”，《航空电子技术》，2007 年第 1 期；
- 2) 柳光福，“变频器干扰及控制”，《国际电子变压器》，2003 年第 2 期；
- 3) 柳光福，“电源滤波器的正确选用与安装”，《安全与电磁兼容性设计》，1996 年第 1 期；
- 4) 陈穷，将全兴，柳光福等，《电磁兼容性设计手册》，国防工业出版社，1993；