

文章编号: 1005-8451 (2011) 03-0013-04

## GSM-R 中高线性功率放大器的研究

卢晓辉, 张小津

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 分析非线性失真对于 GSM-R 的影响; 阐述射频功率放大器中的非线性指标; 对前馈射频功率放大器前馈系统进行软件仿真, 实现了中心频率为 932 MHz, 带宽为 4 MHz, 输出功率为 20 W 的前馈功率放大器。为提高 GSM-R 中的射频功率放大器线性度提供了一种实用、有效的设计方法。

**关键词:** 功率放大器; 失真; 前馈; 线性化

中图分类号: U285

文献标识码: A

### Research on high linear power amplifier in GSM-R

LU Xiao-hui, ZHANG Xiao-jin

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** This paper analyzed the influence of the nonlinear distortion towards the GSM-R, described the nonlinear index of the RF power amplifiers, made software simulation on the composition of the feed-forward RF power amplifier and Feed-forward System, implemented the feedforward power amplifier of the 932 MHz center frequency, 4 MHz bandwidth and 20W output power, provided a practical and effective approach of improving RF power amplifier's linearity in GSM-R.

**Key words:** power amplifier; distortion; feedforward; linearization

全球铁路移动通信系统 (GSM-R) 的引入提高了铁路无线通信装备的水平, 为铁路安全运行提供了可靠的无线通信平台。但是铁路的 GSM-R 是基于公网的 GSM 之上的, 它的通信模式与公网相同, 使用的频率范围与公网的 GSM 很接近, 因此在铁路沿线尤其是在城市的环境下, GSM-R 与公网 GSM 的非线性信号会产生相互影响, 导致系统无法正常使用。如何提高系统的线性性能是一个需要解决的问题。

射频功率放大器是射频系统的重要部件, 也是产生非线性信号的主要部件, 它的线性性能直接关系到通信系统的非线性性能, 因此提高功率放大器的线性度是一种改善系统线性度的方法。

### 1 非线性信号的产生和影响

#### 1.1 互调干扰的产生与分析

互调干扰是指两个或多个频率不同幅度相近的信号通过非线性电路时, 会产生与有用信号频率相同或相近的频率组合, 而对通信系统构成的

一种干扰。在移动通信系统中, 产生互调干扰的原因主要有 3 个方面: 发射互调、接收互调和外部效应引起的互调。

系统通常采用共用宽带功率放大器的方式来实现多信道通信, 因此当系统工作在多信道载波模式时, 多个频率相近的载波会同时通过末级功率放大器, 由于功率放大器的非线性, 多个载波之间会产生互调干扰信号并伴随有用信号发射, 造成了通信系统的发射互调; 接收机互调主要是由高放级及第一混频级电路的非线性所引起; 外部效应引起的互调主要是由于发射机馈线、高频滤波器等无源电路接触不良, 以及由于异种金属的接触部分非线性等原因, 使强电场的发散信号引起互调, 产生干扰源。

由于功率放大器是主要的功率输出器件, 它的输出功率以及互调干扰远远大于接收互调和外部效应引起的互调, 因此引起互调干扰的主要原因就是功率放大器的非线性。功率放大器产生的互调失真, 以 2 阶和 3 阶失真幅度为最大, 阶数越高失真越小。2 阶互调  $fa+fb$ 、 $fa-fb$ , 因其频率远离主载波信号频率  $fa$ 、 $fb$ , 很容易采用物理滤波器的方法滤除, 所以不在考虑范围之内。3 阶

收稿日期: 2010-12-13

作者简介: 卢晓辉, 在读硕士研究生; 张小津, 副教授。

互调的2种模型 $2fa-fb$ 、 $fa+fb-fc$ ，因其频率接近或等于主载波信号频率，对通信的影响最大。3阶以上互调失真幅度较小，同时由于频点距离主载波信号较远，可以被滤波器抑制，均不在考虑范围之内。

## 1.2 互调干扰对GSM-R的影响

非线性度对GSM-R的影响有3个方面：互调干扰对系统的影响，对相邻基站小区的影响，对自身上行信号的影响。

## 2 前馈功率放大器的设计方案、仿真及测试

### 2.1 功率放大器线性化技术

(1) 功率回退技术。把功率放大器的输出功率从1dB压缩点向后回退，工作在远小于1dB压缩点的电平上，使功率放大器远离饱和区，工作在线性区，从而改善功率放大器的3阶交调系数。实际上，功率回退法是选用输出功率较大的功率放大管输出较小功率，来达到改善线性的目的，它是以牺牲直流功耗和功率放大器的效率来换取功率放大器线性度的改善。

(2) 负反馈技术。将放大器的输出信号送入反馈网络后在放大器的输入端产生反馈信号。该反馈信号与放大器原来输入的信号共同控制放大器的输入，构成反馈放大器。反馈放大器利用放大器输出的非线性失真信号抵消放大器自身的一部分非线性，因此负反馈对放大器输出信号的稳定性、增益的稳定性、非线性失真等都有改善作用。

(3) 预失真技术。对通过模拟电路网络或者数字算法等技术手段产生特定的补偿信号，对功率放大器输入输出的非线性信号进行校正，从而达到改善线性度的目的。预失真技术按照工作频段可以分为射频预失真，中频预失真和基带预失真。

其中射频预失真对功率放大器工作频段内的射频信号进行补偿；中频预失真通过将射频信号变为中频频率，在中频频率上对失真信号进行补偿，但是其精度不如射频预失真；基带预失真是通过软件算法将功率放大器的预失真系数计算出来，通过不同的权重来补偿功率放大器的线性度。

(4) 前馈技术。将主功率放大器产生的失真信号进行提取，通过调节主信号和失真信号的幅度和相位，在放大器输出端对失真信号进行抵消来达到线性化的目的。前馈技术兼顾了闭环系统和开环系统的优点，既可以得到与闭环系统相仿的线性化水平，还具有开环结构的稳定性和宽带。因此，前馈系统的工作频率和动态范围较其它线性化技术要好很多，同时在电路中功率放大器产生的非线性信号被抵消，如果幅度和相位调节精确的话，可以达到很高的线性度改善效果。

### 2.2 前馈功率放大器原理

前馈功率放大器的各部件全部工作在射频频段。由信号抵消环路和失真抵消环路组成。输入初始信号在信号抵消环路中通过功率分配器C1一分为二，其中一路通过主功率放大器、耦合器后将主功率放大器一部分信号提取出来，然后经过衰减器和移相器，输入到另外一路的输出口；另外一路为延迟线，主要作用是通过延迟信号，使本路信号的相位与通过主功率放大器的信号幅度相同，相位翻转180°，在合成器C3处，通过主功率放大器的信号分量与通过下面支路的输入信号分量进行抵消，抵消后只剩下功率放大器产生的失真信号输入到失真抵消环路环路。失真抵消环路的上支路为延迟线，作用是抵消辅助功率放大器带来的信号相位的延迟；下支路的输入信号为失真信号，通过辅助放大器放大后，再经过衰减器和移相器的调节，使提取的失真信号分量与上面支路信号中的失真信号分量幅度相等，相位翻转180°，最后在C4合成器处进行抵消，最终的输出信号是主功率放大器被抵消了失真信号分量的输出信号，从而达到了提高线性度的目的。前馈功率放大器的原理如图1。

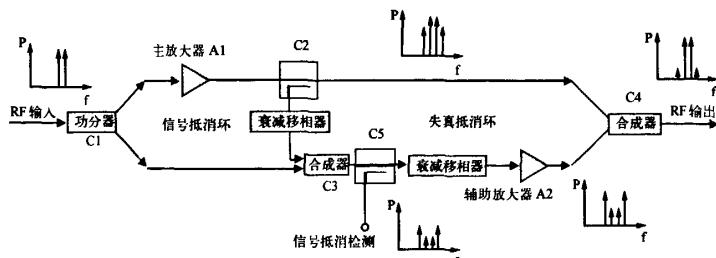


图1 前馈功率放大器原理图

### 2.3 前馈功率放大器的设计及仿真

GSM-R前馈功率放大器的整体结构如图2。

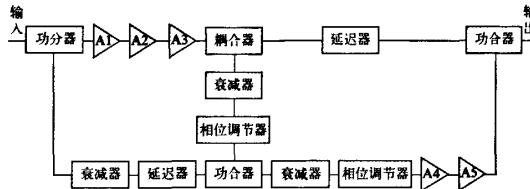


图2 前馈功率放大器的整体结构图

前馈功率放大器的主要技术指标：工作频率范围：930 MHz~934 MHz。压缩点输出功率：>43 dBm。3阶交调分量：<-60 dBc@43 dBm。增益：>40 dB。输入输出驻波：<1.5。

#### 2.3.1 主功率放大器的设计

主功率放大器由3级放大器级联实现，射频信号经过前级功放、推动级和输出级3级放大后，最终输出功率不小于43 dBm (20 W)，3阶交调分量不超过35 dBc。采用3级放大的方式实现放大器的设计，主要考虑电路实现的难易程度，功率放大器的稳定性因素，为了提高功放的线性度，使用了较小增益但是输出功率较大的功率放大器。为了取得较好的线性度指标，一般会采用功率回退的方式使功率放大器处于线性区，这将影响功率放大器的效率和增益。在实际设计中，增益由多级放大器来实现。将每级放大器的增益平均分配，同时留出一定的余量，使功率放大器工作在线性区，兼顾功率放大器的线性度指标。级联的级数也不可太多，以免增加功放的故障点和调试难度。本系统的增益分配如下：第1级增益为13 dB，第2级增益为18 dB，第3级增益17 dB，去除功分器和耦合器的损耗后，总的增益大概为42 dB左右。

主功率放大器的主要技术指标：工作频率范围：930 MHz~934 MHz。输出功率：>43 dBm。3阶交调分量：<-35 dBc@43 dBm。增益：>40 dB。输入输出驻波：<1.5。

#### 2.3.2 辅助功率放大器的设计

辅助功率放大器由2级放大器级联组成，射频信号经过前级功放、输出级2级放大后，最终输出功率不小于10 dBm，3阶交调分量不超过65 dBc，对辅助放大器的要求是增益高，线性度高，不会引入新的失真分量。因此辅助放大器需要采用回退功率的方式进行设计。射频小信号经过2级放大，

最终输出功率不小于10 dBm。本系统的增益分配如下：第1级增益为21 dB，第2级增益为18 dB，总的增益大概为39 dB左右。

辅助放大器的设计指标：工作频率范围：930 MHz~934 MHz。输出功率：>10 dBm。3阶交调分量：<-65 dBc@10 dBm。增益：>35 dB。输入输出驻波：<1.5。

#### 2.3.3 功分器和耦合器的设计

##### (1) 功分器

功分器是进行功率分配的，在前馈功率放大器中的作用是将对主功率放大器通路信号和辅助功率放大器通路信号进行分配或合成，大功率微波单功分器采用波导或同轴结构，中小功率则采用带状线或微带线结构。本设计中采用的是930 MHz~940 MHz等功率分配的微带功分器。

功分器设计指标：工作频率范围：930 MHz~934 MHz。插入损耗：<3.5 dB。端口隔离度：>20 dB。连续通过功率：>20 W。输入输出驻波：<1.5。

##### (2) 耦合器设计

耦合器是进行功率耦合提取的，在前馈功率放大器中的作用是将对主功率放大器通路信号进行耦合，提取一部分信号进入辅助放大器进行主载波对消和3阶互调信号放大，本设计中采用的是930 MHz~940 MHz的30 dB微带耦合器。

耦合器设计指标：工作频率范围：930 MHz~934 MHz。插入损耗：<0.3 dB。耦合损耗：30 dB。连续通过功率：>20 W。输入输出驻波：<1.5。

#### 2.3.4 系统仿真

经过上面对各部件的设计，在此基础上拟定了适用于GSM-R前馈功率放大器系统的ADS仿真电路图，对整个前馈放大器系统进行了仿真。

系统仿真结果如图3，图4。

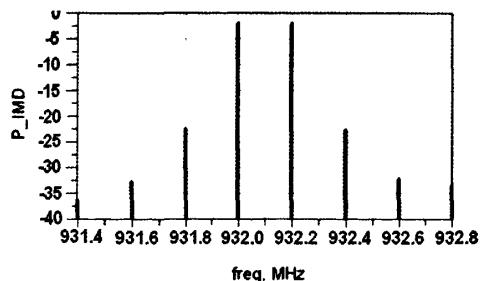


图3 主功放振前的输出信号

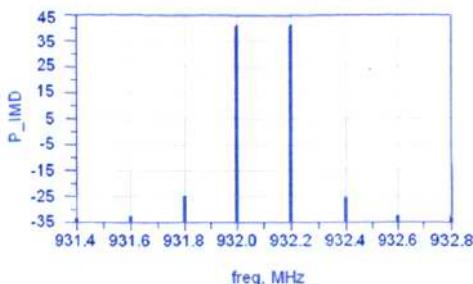


图4 主功放抵消后的输出信号

以上对中心频率为 932 MHz 的 GSM-R 前馈功率放大器进行了仿真,结果显示未线性化前,这款射频功率放大器的3阶交调失真为 39 dBc,而采用前馈线性化方法之后的3阶交调减小了 29 dB,达到了 68 dBc,证明前馈系统对于功率放大器的线性度具有较强的改善作用。

### 2.3.5 前馈功率放大器系统测试

根据设计指标和仿真结果,对 GSM-R 前馈功放进行实验室的实际测试。

所使用的仪表工具:信号源 Agilent E4432,频谱仪 Agilent E4402B,万用表,30 dB 衰减器,测试电缆,直流电源 DH3210,转接头若干。

双音输入信号分别为 931.9 MHz,932.1 MHz,幅度为 0 dBm。

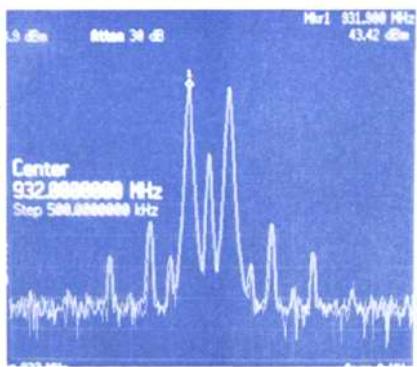


图5 未开启前馈时主功放的输出

图5中,当主功放输出在 43 dBm(即 20 W)时,3 阶互调信号幅度约在 0 dBm 左右,与前节仿真结果基本一致。图6中,当主功放输出在 43 dBm(即 20 W)时,3 阶互调信号幅度约在 -20 dBm 左右,最终互调为 -63 dBc,较未进行前馈前的功放改善了 20 dBc,实际测试结果显示,前馈系



图6 开启前馈后主功放的输出

统对功率放大器的线性度的改善较为明显。

## 3 结束语

本文使用前馈线性化方法设计了中心频率 932 MHz、带宽 4 MHz、输出功率 20 W 的功率放大器,对其进行了部件及系统仿真,并依据结果实现了前馈功率放大器的硬件设计,最终测试结果显示输出信号中 3 阶交调 IMD3 达到 -63 dBc,比线性化前减小了 20 dB,实现了较好的线性输出。

前馈系统对功率放大器线性度的改善较为理想,是实现功率放大器线性度的一种有效手段。采用矢量幅度调节器来实现较为精确的幅度和相位调节,达到了较好的效果。前馈功放虽然是一种较为理想的线性化技术,但是也存在一些问题,电路复杂度高,调试困难,幅度和相位会随着外界环境的变化而变化,对抵消效果产生比较大的影响,导致前馈功放的线性度变差,在实际的产品中,需要一些额外的电路来进行自适应的控制,来稳定前馈功放的线性度指标。

## 参考文献:

- [1] 钟章队,李旭,蒋文怡.铁路综合数字移动通信系统(GSM-R)[M].北京:中国铁道出版社,2003,9: 2-6.
- [2] 高晨亮.GSM-R 干扰评估及定位研究[D].北京:北京交通大学硕士论文,2007,12: 39-41.
- [3] 刘晓峰.GSM/GSM-R 网络干扰分析与测量[D].北京:北京交通大学硕士论文,2006,12.
- [4] [美]Reinhold Ludwig,Pavel Bretschko, RF Circuit Design Theory and Applications[M].北京:科学出版社,2002.