

射频功率放大器的线性化技术

李 军*

摘 要 本文阐述了射频功率放大器非线性产生的原因,介绍了几种射频功放的线性化技术,以便于射频功放设计者参考。

关键词 非线性 功率回退 预失真 前馈

The Linearization of RF Power Amplifier

LI Jun

Abstract The reason of non-linearity produced by RF power amplifier is presented in this paper. Some methods for improving the linearity of RF power amplifier such as, back-off, predistortion, feedforward, are also introduced.

Key words Non-Linearity Back-Off Predistortion Feedforward

1 引言

随着现代无线通信业务的迅猛发展,对通信系统容量的要求越来越大;为了追求更高的数据速率和频谱效率,普遍采用线性调制方式,如 QPSK,16QAM;另外,多载波配置技术导致了信号包络的变化,从而产生了交调失真,尽管频谱再生对本信道的影响不大,但它将会干扰相邻信道,这些都对功率放大器的线性度提出了苛刻的要求。

虽然采用 A 类功放可能会达到要求,但它的效率太低,因此,在高功放的基础上必须对其进行线性化处理,这样可以较好地解决信号的频谱再生问题。实现射频功放线性化的技术很多,本文介绍了三种常用的技术:功率回退、预失真、前馈。

2 功率放大器的非线性分析

设有一功率放大器,其输出电压是输入电压的函数

$$v_o(t) = f[v_i(t)] \quad (1)$$

展开成幂级数形式

$$v_o = k_1 v_i(t) + k_2 v_i^2(t) + k_3 v_i^3(t) + \dots \quad (2)$$

假定输入信号为单一频率的信号, $v_i(t) = V_i \cos \omega_i t$, 则

$$\begin{aligned} v_o(t) &= k_1 V_i \cos \omega_i t + k_2 V_i^2 \cos^2 \omega_i t + k_3 V_i^3 \cos^3 \omega_i t + \dots \\ &= \frac{1}{2} k_2 V_i^2 + (k_1 V_i + \frac{3}{4} k_3 V_i^3) \cos \omega_i t + \\ &\quad \frac{1}{2} k_2 V_i^2 \cos 2\omega_i t + \frac{1}{4} k_3 V_i^3 \cos 3\omega_i t + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

由(3)式可知,由于放大器的非线性,输出信号中除输入信号频率外,还出现了新的直流分量, $2\omega_i$ 、 $3\omega_i$ 等谐波分量。

$$\begin{aligned} \text{如果是双音输入,即 } v_i(t) &= V_i (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t), \text{ 则 } v_o(t) \\ v_o(t) &= k_1 V_i (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) + k_2 V_i^2 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)^2 + \\ &\quad k_3 V_i^3 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)^3 + \dots \\ &= k_2 V_i^2 + (k_1 V_i + \frac{9}{4} k_3 V_i^3) \cos \omega_1 t + (k_1 V_i + \frac{9}{4} k_3 V_i^3) \\ &\quad \cos \omega_2 t + k_2 V_i^2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t + k_2 V_i^2 \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \frac{1}{2} \\ &\quad k_2 V_i^2 \cos 2\omega_1 t + \frac{1}{2} k_2 V_i^2 \cos 2\omega_2 t + \frac{3}{4} k_3 V_i^3 \cos(2\omega_1 - \omega_2)t + \frac{3}{4} \\ &\quad k_3 V_i^3 \cos(2\omega_2 - \omega_1)t + \frac{3}{4} k_3 V_i^3 \cos(2\omega_1 + \omega_2)t + \frac{3}{4} k_3 V_i^3 \cos \\ &\quad (2\omega_2 + \omega_2)t + \frac{1}{4} k_3 V_i^3 \cos 3\omega_1 t + \frac{1}{4} k_3 V_i^3 \cos 3\omega_2 t + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

由(4)式可以看出,双音输入时输出端口的成分由直流成分,基频 ω_1 和 ω_2 ,二次和三次谐波 $2\omega_1$ 、 $2\omega_2$ 、 $3\omega_1$ 及 $3\omega_2$,二次互调分量 $\omega_1 \pm \omega_2$,三次互调分量 $2\omega_1 \pm \omega_2$ 、 $2\omega_2 \pm \omega_1$,等分量组成。一般情况下,仅 $2\omega_1 - \omega_2$ 、 $2\omega_2 - \omega_1$ 落在通带内,是主要考虑的非线性产物。

3 射频功放的线性化技术

基本线性化技术的原理与方法不外乎是以输入 RF 信号包络的振幅和相位作为参考,与输出信号比较,进而产生适当的校正。多数情况下,线性化后的功放仍要从压缩点回退。

3.1 功率回退(Back-Off)

这是最常用的方法,即选用功率较大的管子作小功率管使用,实际上是以牺牲直流功耗来提高功放的线性度。

* 电子科技大学电子工程学院 成都市 610054

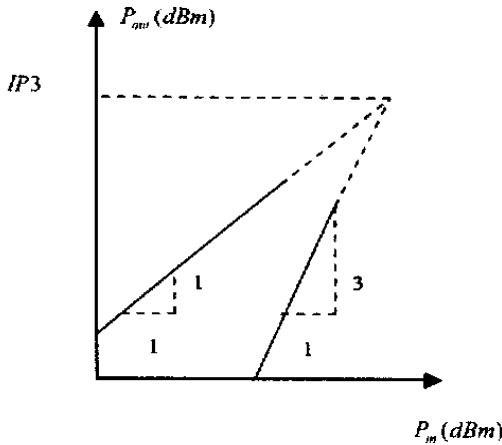


图1 功放基波与三阶交调特性曲线

功率回退法就是把功率放大器的输入功率从1dB压缩点向后回退几个分贝,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,进入线性工作区,从而改善功率放大器的三阶交调系数。一般情况,当基波功率降低1dB时,三阶交调失真改善3dB,如图1所示。

功率回退法简单且易实现,不需要增加任何附加设备,是改善放大器线性度行之有效的办法,缺点是功率放大器的效率大为降低;另外,当功率回退到一定程度,即当 IM_3 达到-40dBc以下时,继续回退将不再改善放大器的线性度。因此,在线性度要求很高的场合,完全靠功率回退是不够的。

3.2 预失真 (Predistortion)

预失真就是在功率放大器前增加一个非线性电路用以补偿功率放大器的非线性。预失真线性化技术的原理如图2。

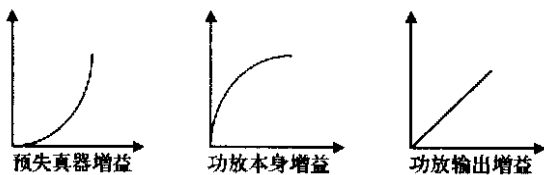
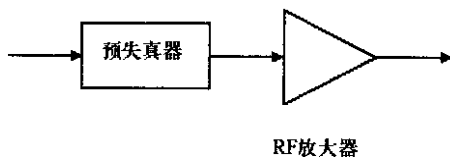


图2 预失真线性化技术原理框图

预失真线性化技术,它的优点在于不存在稳定性问题,有更宽的信号频带,能够处理含多载波的信号。预失真技术价格便宜,由几个仔细选取的元件封装成单一模块,连在信号源与功放之间,就构成预失真线性功放。手持移动台中的功放已采用了预失真技术,它仅用少量的元件就降低了互调 IM 产物几dB,但却是很关键的几dB。

预失真技术分为RF预失真和数字基带预失真两种基本类型。RF预失真一般采用模拟电路来实现,具有电路结构简单、成本低、易于高频、宽带应用等优点,缺点是频谱再生分量改善较少、高阶频谱分量抵消较困难。

基带预失真由于工作频率低,可以用数字电路实现,适应性强,而且可以通过增加采样率和增大量化阶数的办法来抵消高阶互调失真,是一种很有发展前途的方法。数字基带预失真原理如图3。

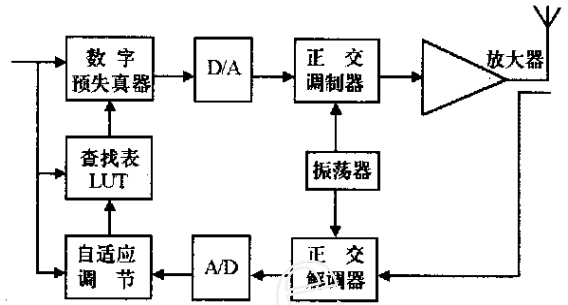


图3 数字预失真技术原理框图

数字预失真器由一个矢量增益调节器组成,根据查找表LUT的内容来控制输入信号的幅度和相位,预失真的大小由查找表LUT的输入来控制。矢量增益调节器一旦被优化,将提供一个与功放相反的非线性特性,理想情况,这时输出的互调产物应该与双音信号通过功放的输出幅度相等而相位相反,也就是说,自适应调节模块就是要调节查找表的输入,从而使输入信号与功放输出信号的差别最小。注意到,输入信号的包络也是查找表LUT的一个输入,反馈路径来取样功放的失真输出,然后经过A/D变换送入自适应调节DSP中,进而来更新查找表LUT。

3.3 前馈 (Feedforward)

前馈技术起源于“反馈”,应该说它并不是什么新技术,早在二三十年代就由美国贝尔实验室提出来了。除了校准(反馈)是加于输出之外,概念上完全是“反馈”。

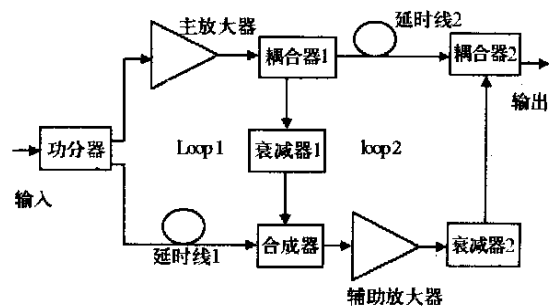


图4 前馈线性化技术原理框图

前馈线性化技术原理如图4。由主放大器、耦合器1、衰减器1、合成器、延时线1、功分器组成环路1,其作用是抵消放大器的主载频信号;由耦合器1、延时线2、耦(下转第33页)

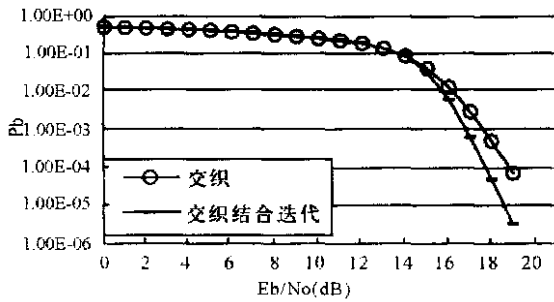


图5 交织、交织结合迭代对第一级的影响

的其它两级信息的可靠性并未提高,这也与我们采用硬判决译码有关。可见,迭代多级译码只有与交织技术结合使用才能提高MLC系统的性能。如果只采用迭代译码,只会将误码进一步传播。所以在交织的基础上进行迭代译码,以充分利用各分量级的译码信息。

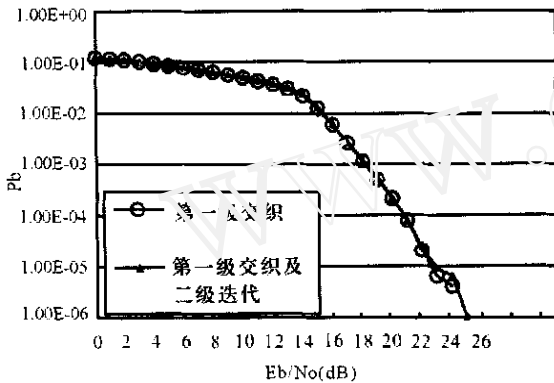


图6 未交织、交织、交织结合两级迭代对第二级的影响

5 结论

本文在多级编码调制系统中加入比特交织技术,克服“错误传播”现象,同时采用迭代多级译码方法,在译完第二级和第三级的码序列后,再综合这两级的信息对第一级码序列重新估计,使得每一级分量码都有性能的改善,从而提高整个系统的性能。仿真分析可见迭代多级译码只有与交织技术结合使用才能提高MLC系统的性能。

6 参考文献

- 1 H. Imai and S. Hirakawa, "A New Multilevel Coding Method Using Error Correcting Codes", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. IT-23, pp. 371 ~ 376, May, 1977
- 2 J. Huber and Udo Wachsmann, "Capacity of Equivalent Channels in Multilevel Coding Schemes", Electron. Lett., vol. 30, No. 7, pp. 557 ~ 558, 1994
- 3 G. Ungerboeck, "Channel Coding with Multilevel/Phase Signals", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. IT-28, pp. 55 ~ 67,

Jan., 1982

- 4 Dong-Feng Yuan, Xue-Mei Zhu, "The application of interleaver in the multilevel coding system over the Rayleigh fading channel", IEEE MILCOM '2001, Oct. 28 - 31, 2001, Mclean, VA, USA
- 5 Dong-Feng Yuan, Cheng Xiang Wang, Qi Yao, and Zhi Gang Cao, "Optimization Criterion for Multilevel Coding Systems over Mobile Fading Channels", FTF '99, Beijing, China, December 7 - 8, 1999

(收稿日期:2003-05-09)

(上接第30页)

合器2、衰减器2、辅助放大器、合成器、衰减器1组成环路2,其作用是抵消主放大器非线性产生的交调分量,改善功放的线性度。

射频信号输入后,经功分器分成两路。一路进入主功率放大器,由于其非线性失真,输出端除了有需要放大的主频信号外,还有三阶交调干扰。从主功放的输出中耦合一部分信号经衰减器1调节幅度,并与另一路经过延时线1延时的输入信号在合成器中叠加,使主载频信号完全抵消,只剩下反相的三阶交调分量。三阶交调分量经辅助放大器放大后与经延时线2延时的主功放输出信号在耦合器2中叠加,抵消主功放的三阶交调干扰,从而得到线性的放大信号。

前馈技术既提供了较高校准精度的优点,又没有不稳定和带宽受限的缺点。当然,这些优点是用价格换来的,由于在输出校准时,功率电平较大,校准信号需放大到较高的功率电平,这就需要额外的辅助放大器,而且要求这个辅助放大器本身的失真特性应处在前馈系统的指标之上。当然,校准环中添加一辅助功率放大器,因而总效率有所降低。

前馈功放的抵消要求是很高的,需获得幅度、相位和时延的匹配,如果出现功率变化、温度变化及器件老化等均会造成抵消失灵,为此,在系统中考虑自适应抵消技术,使得抵消能够跟上内外环境的变化。

4 总结

以上分析了功率放大器非线性产生的原因,详细阐述了三种常用的功放线性化技术,功率回退、预失真、前馈,给出了各自的原理及优缺点,以便于射频功放设计者设计时参考。

5 参考文献

- 1 张玉兴. 射频模拟电路. 电子工业出版社,北京:2002.9
- 2 Shawn P. Stapleton Digital Predistortion of Power Amplifiers. Agilent Technological
- 3 Sang-Gee Kang. Analysis and Design of Feedforward Power Amplifier. 1997 IEEE MTT-S
- 4 杜承法. W-CDMA多载波线性功放. 无线电工程,2001
- 5 樊建成. 微波功率放大器非线性分析. 微波与卫星通信, 1995.3

(收稿日期:2003-04-16)

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(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),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>