

射频放大器前馈技术仿真

陈建新, 谢万波, 杨维明, 史辰

(北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘要: 为了满足现代无线通信对放大器线性度的要求, 需要对射频放大器的线性度进行优化. 讨论了前馈技术的原理和方法, 并用 ADS 软件进行了仿真. 利用前馈技术优化的放大器, 线性度改善了 40 dB 以上, 表明前馈技术对改善放大器的线性度效果明显.

关键词: 射频放大器; 前馈; 线性度

中图分类号: TN 722

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2006)10-0870-04

现代数字无线通信系统要求能在多调制模式、宽频率范围工作, 这对射频部分的线性度提出了较高要求, 尤其是功率放大器的线性度将直接影响系统的性能^[1]. 目前, 常用的改善放大器线性度的方法包括功率回退、预失真、反馈和前馈^[2]. 较之其他方式, 前馈技术虽然实现起来较为复杂且成本较高, 但具有线性度改善高、校准精度高、稳定性高和不受带宽限制等优点, 使其成为改善功率放大器线性度的主要技术, 甚至在某些场合是唯一能满足要求的线性化技术.

1 放大器的非线性

大信号下工作的非线性放大器可以简单地描述为^[3]

$$y(t) = a_1x(t) + a_2x^2(t) + a_3x^3(t) + \dots$$

一般情况下, 可以忽略 3 次方以上的项, 当输入信号 $x(t) = A \cos \omega t$ 时, 输出信号

$$y(t) = a_1x(t) + a_2x^2(t) + a_3x^3(t) + \dots \approx$$

$$a_1A \cos \omega t + \frac{1}{2}a_2A^2(1 + \cos 2\omega t) + \frac{1}{4}a_3A^3(3\cos \omega t + \cos 3\omega t) =$$
$$\frac{a_2A^2}{2} + \left(a_1A + \frac{3a_3A^3}{4} \right) \cos \omega t + \frac{a_2A^2}{2} \cos 2\omega t + \frac{a_3A^3}{4} \cos 3\omega t$$

通常情况下 a_1 和 a_3 符号相反^[4], 所以基波信号幅度 $\left(a_1A + \frac{3a_3A^3}{4} \right)$ 随着输入信号幅度 A 的增大逐渐偏离线性, 这就是所谓的增益压缩, 同时各失真分量逐渐变大 (以 mW 为基准), 如图 1 所示.

通常情况下 3 次谐波分量对电路的影响最大, 因为当一定频率间隔的双音信号输入时, 3 阶交调分量主要由 3 次方项产生, 而 3 阶交调分量往往落在信道之内形成干扰, 这是放大器非线性对通信电路的主要影响之一. 下面的仿真实验用幅度相同、频率间隔很小的双音信号产生的 3 次互调分量评价电路的线性度.

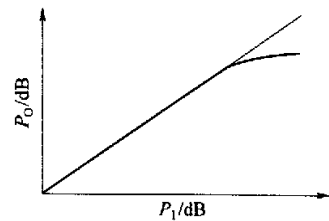


图 1 放大器非线性失真

Fig. 1 Nonlinear effects of amplifier

收稿日期: 2005-09-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60476034).

作者简介: 陈建新(1946-), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士生导师.

2 前馈放大器的基本原理

前馈放大器有 2 个环路，一个环路完成误差信号的提取，另一个环路作为误差信号的抵消。图 2 中输入的射频信号经功分器分成 2 路，一路经主放大器放大后由耦合器耦合出一部分，经衰减器 1 和移相器 1 进行幅度和相位调整后到达合成器 1，该路信号包含基波和由于主放的非线性产生的失真信号；功分器分出的另一路信号经延迟线 1 到达合成器 1，不考虑功分器的线性度问题，该路信号中只包含基波分量。2 路信号在合成器 1 中合成后抵消掉其中的基波分量，输出的失真信号经误差放大器（从放）放大到合适的值后，经移相器 2 和衰减器 2 进行相位和幅度的适当调整后和主放经延迟线 2 过来的包含基波和失真分量的主信号在合成器 2 中相加，抵消其中的失真分量，输出放大的基波信号，该信号的线性度理论上可以无限地优化。可见，这 2 个环路中幅度和相位的精确控制是误差信号提取和对消的关键，另外从放的线性度必须大于主放才能有效地改善线性度。

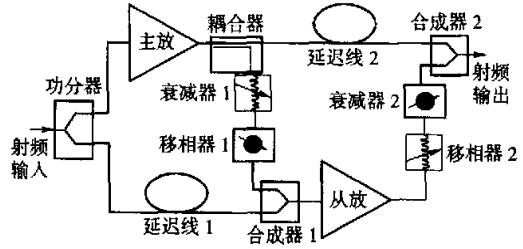


图 2 前馈放大器原理示意图
Fig. 2 Feedforward amplifier block diagram

3 误差信号的提取和对消

根据前馈放大器的基本原理，误差信号在合成器 1 和合成器 2 中的提取和对消是前馈技术的关键，实验用的 2 个合成器均用 3 dB 正交电桥（见图 3），S 参数矩阵为^[5]

$$S = \begin{bmatrix} 0 & \frac{e^{-j\pi/2}}{\sqrt{2}} & \frac{e^{-j\pi}}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{e^{-j\pi/2}}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \frac{e^{-j\pi}}{\sqrt{2}} \\ \frac{e^{-j\pi}}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \frac{e^{-j\pi/2}}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{e^{-j\pi}}{\sqrt{2}} & \frac{e^{-j\pi/2}}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix}$$

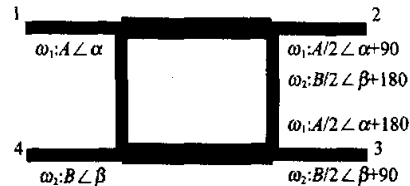


图 3 3 dB 正交电桥
Fig. 3 90-degree hybrid coupler

由各端口对应的相位和幅度关系可见，如果端口 1 输入信号 $\omega_1: A \angle \alpha + \omega_2: B \angle \beta$ ，其中 ω_1, ω_2 是输入信号的频率，A、B 和 α, β 分别是输入信号的幅度和相位，则端口 2、3 的输出分别为

$$\omega_1: \frac{A}{2} \angle \left(\alpha + \frac{\pi}{2} \right) + \omega_2: \frac{B}{2} \angle \left(\beta + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\omega_1: \frac{A}{2} \angle (\alpha + \pi) + \omega_2: \frac{B}{2} \angle (\beta + \pi)$$

如果同时在端口 4 加信号

$$\omega_1: A \angle \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right)$$

则该信号在端口 2、3 的输出分别为

$$\omega_1: \frac{A}{2} \angle \left(\alpha + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\omega_1: \frac{A}{2} \angle \alpha$$

可见在端口 3 信号 ω_1 的幅度相同、相位相反而抵消，只剩下信号 ω_2 分量。如果让经主放大器放大包含基波和失真分量的信号由端口 1 输入，让没经放大的基波信号由端口 4 输入，基波信号满足上面信号 ω_1 的

相位幅度关系,则可以在端口3抵消其中的基波信号而提取出失真信号;同样的道理可以抵消掉失真分量.

4 前馈放大器仿真

下面根据前馈放大器的基本原理,用 ADS 仿真软件进行仿真,仿真原理图见图 4. 仿真的目的是验证前馈技术对改善线性度的有效性,为方便起见,选用一款普通放大器,工作在 1.9 GHz 时 1 dB 增益压缩点处的输出功率约 1 dB,为了让器件表现出明显的非线性,更清楚地看到前馈对改善线性度的有效性,让器件工作在稍高于 1 dB 增益压缩点处. 功率源用相隔 4 MHz 的双频率源(即 1 898 MHz 和 1 902 MHz),可以较好地看到输出信号中的 3 阶交调成分 IM3.

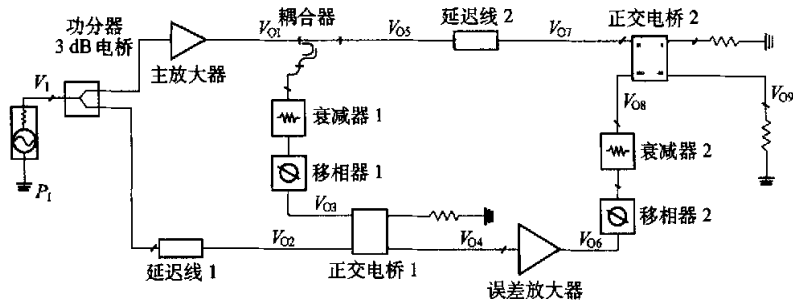


图 4 前馈放大器仿真原理图

Fig. 4 The simulation circuit of feedforward amplifier

失真信号的提取和对消均用 3 dB 正交电桥,电路中的衰减器、延迟线、功分器和移相器等均采用理想的器件模型(不会影响结果的正确性),误差放大器用和主放同样的放大器模型,由于误差放大器放大的误差信号幅度远小于主放放大的基波信号幅度,由功率回退的原理知,误差放大器输出的信号线性度要好远于主放.

仿真中,2 个环路应分开调整.先调整第 1 个环路的相位和幅度,在 V_{04} 处观察误差信号的提取情况,使主信号被抑制到最低点;环路 2 成功实现对误差信号的提取是后面系统环路成功的基础.在调整好第 1 个环路的基础上,调整第 2 个环路的相位和幅度,在 V_{09} 处观察失真信号的抵消情况.

由图 4 可见,每个环路中都有移相器和延迟线 2 个相位调整元件,这里的延迟线采用微带线实现,即在实际电路中延迟线长度是不可调的,延迟线的长度由延迟线和移相器之间的关系确定.

以第 1 环路为例,设主信号的频率为 ω ,主放大器、耦合器、衰减器 1 和移相器 1 的时延为 τ_1 ,则它们的相位总的延迟量为 $\theta_1 = \omega\tau_1$,延迟线 1 的长度为 l ,信号在延迟线上的传输速度为 v ,则信号通过延迟线的相位延迟量为 $\theta_d = \omega l/v$.设移相器的移项量为 θ_p ,则对环路和电桥的分析可知,主信号在电桥端口 1 和端口 4 的相位差应有 $\Delta\varphi = 90^\circ + 2N\pi$,其中 N 为自然数,则有

$$\Delta\Phi = -(\theta_1 + \theta_p) - (-\theta_d) = \theta_d - \theta_1 - \theta_p = \omega l/v - \omega\tau_1 - \theta_p = 90^\circ + 2N\pi$$

对于特定电路,在特定条件下 τ_1 是个不变量,因此延迟线的长度由移相器的移项量确定,实际设计中考虑到匹配电路不同的拓扑结构和其他因素导致回路不同的时延,移相器初始的移项量应定在移项范围的中心附近,可使移项器调整的范围最大.

在线路调整时,应该先把移项器的移项量放在合适的值,然后测量主信号经主放、耦合线、移相器 1 和衰减器 1 后达到电桥端口 1 时的相位延迟量,由此计算出延迟线的长度.确定好延迟线的长度后,根据实际测得的结果再微调移项器,使输出信号最佳.在仿真时,可以只调整延迟线的长度,把移项器的调整量留给实际电路调整.环路 2 的调整和环路 1 类似,最终仿真的结果(以 mW 为基准)见图 5.

由最终仿真结果可知,改善前由于主放大器工作在大于 1 dB 增益压缩点处,输出信号的线性度较差,

IM3 约为 -11 dB(以基波为基准);经前馈技术改善后最终输出结果 IM3 约为 -54 dB(以基波为基准),改善了 40 dB 以上. 同时,输出功率比改善前减小了 3 dB(以 mW 为基准)以上,这是由于误差信号的提取和抵消时,3 dB 正交电桥总有 1 个输出端口的无用信号被短接的电阻消耗掉;另外,从放以及前面的衰减器和移相等也会消耗一定的能量,从而导致放大器的效率不高,这也正是前馈技术的缺点.

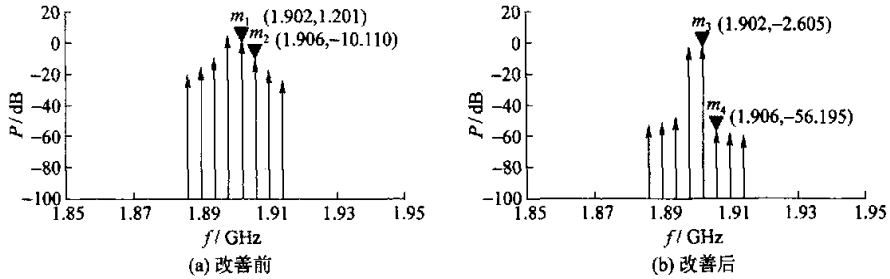


图 5 仿真结果

Fig. 5 The results of simulation

由于仿真是在理想条件下得到的,考虑到前馈系统对相位和幅度的敏感性,实际实现中不能期望有这么大的改善,并且需要考虑更多的实际因素. 首先,有源器件幅度和相位特性的非线性、器件老化和温漂等带来的幅度和相位偏离理想值等因素会引起最终抵消结果的严重恶化^[6];其次,移项器和衰减器等非理想的调整元件调整时,并不是只引起相位或者幅度的单值变化,往往是相位的调整会带来幅度的变化,幅度的调整又引起相位的偏移;另外,环路中各个元件和各支路的插入损耗和时延,以及耦合器和电桥的实际耦合度等,都需要经过准确的测量,才能得到满意的结果.

5 结束语

采用前馈技术仿真的放大器,3 阶交调成分改善了 40 dB 以上,说明该技术对改善放大器的线性度效果明显. 运用该技术设计的前馈放大器可以满足多载波、大容量和高速度的通信系统中对放大器线性度的要求.

参考文献:

- [1] 杜承法. W-CDMA 多载波线性功放[J]. 无线电技术, 2001, 31(12): 16-19.
DU Cheng-fa. W-CDMA Multi-frequency linearity power amplifier[J]. Radio Technique, 2001, 31(12): 16-19. (in Chinese)
- [2] 杨浩模. 通信天线功率放大器的进展[J]. 半导体情报, 2001, 38: 5-6.
YANG Hao-mo. Communication antenna power amplifier improve[J]. Information Semiconductor, 2001, 38: 5-6. (in Chinese)
- [3] 张玉兴. 射频模拟电路[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 102-121.
- [4] CRIPPS S C. RF Power amplifiers for wireless communications[M]. Boston: Artech House, 1999: 4-11.
- [5] 陈邦媛. 射频通信电路[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 74-82.
- [6] GUILLERMO G. 微波晶体管放大器分析与设计[M]. 白晓东, 译. 北京: 清华大学出版社, 2002: 289-241.

(下转第 912 页)

Study on the Operation Analysis of Weaving Sections of Urban Expressway

ZHONG Lian-de, RONG Jian, SUN Xiao-duan, REN Fu-tian

(Beijing Key Laboratory of Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: China has been using the American formula and LOS to analyze the weaving sections of urban expressway all the time, but except that the urban expressway standard is different from American freeway, the operation characteristics, drivers' characteristics and so on are also different from those of foreign countries, so the analyzed result whether or not accords with actual conditions is still a question. The most effective, scientific method is to use the field data of China to calibrate the existing formula, so the field data gathered from the weaving sections of the expressway in Beijing, Shanghai and Guangzhou to calibrate the operation speed formula of weaving sections of HCM2000, U.S.A. Through validation and using calibrated formula to do example analysis, it proves that the result from calibrated formula can reflect actual operation conditions of the weaving sections objectively, thus it has good value for application. In addition, through surveying and studying the situation and conditions of weaving sections in existing expressway system in China, weaving sections are divided into 3 types of configuration, that is type I, II and III.

Key words: expressway; weaving sections; operation analysis; speed; mathematical models; calibration

(上接第 873 页)

Simulation of Feedforward RF Amplifier

CHEN Jian-xin, XIE Wan-bo, YANG Wei-ming, SHI Chen

(Beijing Optoelectronics Lab, College of Electronic Information and Control Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Modern wireless telecommunication requires high linearity of radiofrequency amplifiers. Feedforward technique is the most effective and sometimes the only one that can improve the linearity to satisfy the system demands. It improves the linearity of an amplifier through the following three steps, extracting the nonlinear distorted component from the output of the amplifier, adjusting the amplitude and phase of this nonlinear distorted component to obtain the same amplitude and opposite phase as the distorted component of the amplifier output, and counteracting the distorted component by summing up the adjusted nonlinear distorted component and the amplifier output. ADS is one of the most popular software for radiofrequency circuitry design. Its simulation results can reflect the characteristics of circuits correctly. In this paper, we elaborate the basic theories and methods of feedforward technique. Then we simulate a feedforward amplifier by using ADS software. The simulation shows that the third-order intermodulation component has been improved by more than 40 dB. The result of the present study suggests that the effectivity of the feedforward technique improves the linearity of amplifiers.

Key words: radio frequency amplifier; feedforward; linearity