面向通信信息系统的全国产化2.25 kW固态功放线性优化研究

王文静

（国家广播电视总局542台，北京 102400）

摘　要　为降低国产2.25 kW固态功放在额定输出状态下产生的增益压缩和调制失真，本研究分析多路功率单元幅相偏差对整机线性度的影响，提出幅相校准结合数字预失真的闭环优化方法。通过校正八路功率单元的合成状态，建立含记忆项的预失真模型，并依据输出反馈更新模型系数。结果表明，优化后功放输出功率保持在2.26 kW，邻道泄漏功率相对值由-31.4 dBc降至-46.8 dBc，误差矢量幅度由5.9%降至1.8%，说明该方法能够兼顾额定功率和信号线性度，满足通信信息系统的大功率信号传输要求。

关键词　通信信息系统；国产固态功放；线性优化；数字预失真；幅相校准

中图分类号：TN73；TN722.75　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.028

0　引言

在通信业务向宽带化、高阶调制方向发展的背景下，固态功放作为通信信息系统发射链路的末级设备，其线性度直接影响频谱占用和调制信号质量[1]。国产2.25 kW固态功放采用多路功率单元合成输出，额定功率运行时容易受到支路幅相偏差、器件增益压缩和温度漂移影响，进而产生邻道频谱扩展及星座点偏移[2]。针对上述问题，本研究采用幅相校准修正功率合成状态，建立数字预失真模型补偿动态非线性，并依据输出反馈迭代更新参数，以改善额定输出状态下的线性放大性能。

1　面向通信信息系统的全国产化2.25 kW固态功放线性特性

1.1　通信信息系统功放链路特征

通信信息系统发射信号经过基带处理和数字上变频后，由激励级送入固态功放，随后通过滤波组件及馈线单元输出[3]。基带侧输出20 MHz带宽的64阶正交幅度调制信号，信号峰均功率比为7.1 dB。固态功放承担末级功率放大任务，额定输出功率为2.25 kW，由八路功率单元经两级合成网络汇集输出。由于调制包络持续变化，功率晶体管的工作点在小信号区和压缩区之间移动。当峰值包络接近饱和功率时，瞬时增益下降会改变星座点幅度，漏极电流变化及匹配网络储能还会引入相位偏移。各支路信号经过功分、放大和合成后，任一通道的增益或相位发生偏移，都会降低合成效率，并使整机非线性呈现多单元耦合特征。因此，线性优化既需处理单个功率单元的器件失真，也需控制多路合成形成的幅相误差。

1.2　固态功放非线性失真机理

固态功放的非线性主要表现为输入输出幅度关系偏离比例状态，以及输出相位随输入包络变化。随着输入功率增大，功率器件逐步进入增益压缩区，幅度调制至幅度调制失真使高幅值采样点受到压缩，幅度调制至相位调制失真则造成星座点旋转。宽带调制信号还受到偏置网络、匹配电路和器件热效应影响，使当前输出不仅取决于当前输入，也与前序采样状态相关[4]。八路功率单元存在器件参数和传输路径差异，实测支路增益最大偏差为1.35 dB，相位最大偏差为11.6°。幅相偏差进入合成网络后，部分射频能量转化为隔离端损耗，支路反射功率随之升高。功率裕量被合成损耗占用后，需要增加激励才能达到额定输出，功率器件因而进入更深的压缩状态，形成合成偏差持续加重器件失真的传递过程。

1.3　固态功放线性优化需求

线性优化需要兼顾额定功率、频谱约束和调制精度，不能单纯依靠扩大功率回退量控制失真。根据系统链路预算，功放连续输出功率应保持在2.25 kW以上，额定状态下增益波动不超过0.5 dB，八路合成效率不

作者简介：王文静（1993-），女，本科，助理工程师，研究方向：通信工程。

低于 87%。针对 20 MHz 调制信号，邻道泄漏功率相对值应不高于 -45 dBc，误差矢量幅度应控制在 2.5% 以内。考虑功率单元温升造成的缓慢漂移，补偿参数还须具备在线修正能力。由此，优化过程需先消除支路静态幅相偏差，恢复功率合成的一致性，再对整机残余非线性建立逆向模型，最后依靠输出采样修正模型系数，使补偿状态能够随器件温度和输出功率变化保持稳定。

2 面向通信信息系统的全国产化 2.25 kW 固态功放线性优化方法

2.1 线性优化总体方案

线性优化采用射频支路校准和基带数字补偿相衔接的结构。发射信号经数字预失真处理后，通过数模转换和上变频形成射频激励，再由驱动级送入八路功率单元[5]。各支路入口配置数控衰减器和数控移相器，合成输出端通过 -50 dB 定向耦合器提取反馈信号。反馈信号完成下变频和模数转换后返回基带处理器，用于幅相测量、模型辨识和参数复核。校准阶段使用连续波逐路测量支路响应，将幅度差控制在 0.2 dB 以内、相位差控制在 2° 以内。支路静态偏差达到限值后，再加载调制信号采集输入序列和反馈序列，据此建立功放逆模型，补偿随信号包络变化的动态失真。

模型投入前，先将输出功率限制在额定值的 70%，完成反馈链路时延对齐和幅度归一化。处理器采用互相关方法估计整数采样延迟，再通过三次插值修正分数时延，使对齐误差不超过 0.1 个采样周期。输出功率随后按 10% 的步长逐级提高，每个功率等级稳定 3 min 后记录模型残差。当输出达到 2.25 kW 且残差均方根变化率低于 1% 时，将参数写入运行区。运行期间每隔 60 s 提取 65 536 个采样点，当邻道泄漏功率相对值连续两个窗口高于 -44 dBc，或反馈增益偏移超过 0.3 dB 时，控制器启动参数更新。

支路状态和器件温度同时纳入保护判定。支路反射功率超过 8 W、合成器隔离端功率连续 3 s 超过 30 W 或结温估算值超过 135 ℃时，控制器冻结预失真系数并将激励降低 0.5 dB，随后检查支路幅相状态。该处理顺序能够阻止异常数据参与模型训练，也可避免数字补偿掩盖功率合成故障。

2.2 功率合成单元幅相校准

幅相校准以第一功率单元为参考通道，其余七路依次接入测量状态。控制器保持总激励功率不变，通过支路耦合端读取复数响应，并计算各通道相对参考通道的幅度偏差和相位偏差。数控衰减器的调节步长为 0.05 dB，数控移相器的调节步长为 0.5° 。初次校准按照测量偏差写入补偿量，复测阶段采用半步修正，以免测量波动造成参数往复变化。单路连续三次测量的幅度极差不超过 0.08 dB、相位极差不超过 0.8° 时，测量结果方可写入控制器；超过限值时，将信号驻留时间延长至 500 ms 后重新采样。

支路初校完成后转入整机合成状态，控制器依据输出功率和隔离端功率复核校准结果。校准过程先将隔离端功率控制在 30 W 以内，再对幅度偏差超过 0.2 dB 的支路进行衰减调整，最后修正相位偏差。每轮仅改变一个支路参数，输出功率增加且隔离端功率下降时保留调整量，否则恢复上一状态并缩小调节步长。连续两轮输出功率变化低于 0.2%、隔离端功率变化低于 0.5% 时结束校准。校准后，支路增益最大偏差降至 0.18 dB，相位最大偏差降至 1.7° ，八路合成效率由 82.6% 提高至 88.4%。

2.3 数字预失真模型构建

幅相校准能够恢复多路合成的一致性，但器件增益压缩和记忆效应仍会造成动态失真。数字预失真采用记忆多项式描述功放逆向响应，其输出为：

$$z(n)=\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{p=0}^{(K-1)/2}c_{p,m}x(n-m)\left|x(n-m)\right|^{2p} \tag{1}$$

式（1）中：$z(n)$ 为预失真输出；$x(n-m)$ 为延迟 m 个采样点的输入信号；$c_{p,m}$ 为第 $2p+1$ 阶非线性项在第 m 个记忆点上的复数系数；K 为最高非线性阶数；M 为记忆深度。根据功放工作带宽和反馈结果，模型最高阶数取 7，记忆深度取 4，仅保留 1、3、5、7 阶分量，共形成 16 个复数参数。该参数规模能够描述功率压缩和短时记忆特征，并将在线计算量控制在处理器允许范围内。

模型训练数据分别从 50%、70%、90% 和 100% 输出功率状态采集，每个状态截取 32 768 个有效采样点。样本先剔除起始瞬态，再按照输入信号均方根值归一化。为避免低幅值样本占比过高，按照包络幅值将样本划分为八个区间，并从各区间等比例抽取数据。模型系数采用正则化最小二乘方法求解，正则化系数取 10^{-4}。辨识完成后，将预失真输出峰值限制在数模转换器满量程的 92%，防止信号硬限幅形成新的频谱分量。在线运行阶段只修正模型系数，不改变阶数和记忆深度。

2.4 输出反馈下的参数迭代

参数迭代以前向输入和反馈输出的归一化误差为依据。更新前，处理器检查输出功率、反馈增益和采样时钟状态，确认数据有效后构造误差序列。模型系数采用遗忘因子为 0.995 的递归最小二乘算法更新，新系数以 20% 的权重写入，原系数保留 80%，从而限制

单次调整幅度。更新后连续采集三个窗口，当邻道泄漏功率相对值改善超过0.5 dB且误差矢量幅度未增大时确认参数，否则恢复上一组系数。

散热器温度变化超过5 ℃、输出功率调整超过1 dB或邻道泄漏功率相对值高于-44 dBc时，检测周期由60 s缩短至10 s；参数连续稳定10 min后恢复原周期。幅相校准和预失真迭代不同时执行，保护条件触发后先检查支路状态，幅相偏差恢复至限定范围后再更新模型。运行参数分别存入工作区和回退区，工作区连续通过三个窗口检验后才覆盖回退区。通信业务切换或反馈采样异常时，控制器可在20 ms内恢复上一组有效参数。

3 面向通信信息系统的全国产化2.25 kW固态功放线性优化试验验证

3.1 试验环境设置

试验平台由信号激励、功率放大、输出采样和指标测量四部分构成，其中矢量信号发生器提供测试信号，定向耦合器提取功放输出，功率计、频谱分析仪和矢量信号分析仪分别完成对应指标测量。测试采用中心频率2.20 GHz、带宽20 MHz的64阶正交幅度调制信号，峰均功率比为7.1 dB，采样率为122.88 MS/s。功放在25 ℃环境下预热30 min，依次测试原始状态、幅相校准状态和闭环优化状态。每种状态连续运行60 min，每10 min记录一次测试结果，表中数据取六次测量的平均值。

3.2 输出功率测试

原始状态下，功放达到2.25 kW输出时需要较高激励，增益波动为1.18 dB。完成幅相校准后，合成效率提高，输出功率达到2.27 kW，增益波动降至0.43 dB。闭环优化投入后，输出功率稳定在2.26 kW，测试期间最大波动为±0.03 kW，增益波动进一步降至0.36 dB。结果说明线性补偿未依赖大幅功率回退，功放仍可保持额定输出能力。

3.3 邻道泄漏抑制效果

分别读取中心频带两侧相邻20 MHz频带内的积分功率，并计算其相对主信道功率的比值，测试结果见表1。

表1 固态功放线性优化试验结果

测试状态	输出功率/kW	增益波动/dB	邻道泄漏功率相对值/dBc	误差矢量幅度/%
原始状态	2.25	1.18	-31.4	5.9
幅相校准状态	2.27	0.43	-35.8	4.6
闭环优化状态	2.26	0.36	-46.8	1.8

幅相校准后，邻道泄漏功率相对值改善4.4 dB，说明支路一致性修正能够减弱合成过程形成的附加失真。闭环优化投入后，该指标降至-46.8 dBc，较原始状态改善15.4 dB，达到不高于-45 dBc的控制要求。左右邻道测量差值保持在0.6 dB以内，补偿后未出现明显的频谱偏斜。

3.4 误差矢量幅度测试

原始状态的误差矢量幅度为5.9%，高幅值星座点出现幅度收缩和相位偏转。幅相校准后，该指标降至4.6%，但仍超过2.5%的控制值。闭环优化状态下，误差矢量幅度降至1.8%，连续运行期间保持在1.7%至2.1%。输出功率变化未触发参数回退，表明反馈迭代能够跟随功率单元温升造成的缓慢漂移。

4 结束语

围绕全国产化2.25 kW固态功放在额定功率状态下的幅相失配和非线性失真问题，本研究从功率合成单元校准、数字预失真建模、输出反馈迭代三个方面提出线性优化方法，形成静态偏差修正与动态失真补偿相衔接的闭环技术路径。受限于试验信号带宽和连续运行时间，当前模型对复杂调制方式及长期温度漂移的适应性仍需拓展。未来可重点研究多工况样本驱动的模型阶次调整，引入在线参数辨识机制增强补偿状态跟踪能力，为国产大功率固态功放的工程整定及通信信息系统发射性能提升提供技术参考。

参考文献：

[1] 张能波，李凯，胡顺勇．面向卫星互联网的V波段500 W线性固态功放研制[J]．电讯技术，2025,65(04):602-607.
[2] 李凯，张能波，刘祚麟，等．Ka频段400 W氮化镓高线性固态功放研制[J]．微波学报，2021,37(06):52-56.
[3] 刘显．宽禁带功率放大器的线性化技术研究[D]．成都：电子科技大学，2025.
[4] 李飞锐，郑宝辉，王雷，等．一种具有温度补偿的GaN功放线性化器[J]．河北工业科技，2021,38(06):460-467.
[5] 孙光辉，张德伟，邓海林，等．用于固态功放反射式宽带预失真器设计方法[J]．强激光与粒子束，2022,34(12):80-85.