



·高功率微波技术·

## 用于固态功放反射式宽带预失真器设计方法\*

孙光辉, 张德伟, 邓海林, 吕大龙, 周东方, 卞晨阁

(中国人民解放军 战略支援部队信息工程大学, 郑州 450001)

**摘 要:** 提出了一种特定增益和相位补偿的反射式宽带线性化器设计方法, 并通过此方法设计了一种补偿固态功率放大器失真特性的预失真电路。利用肖特基二极管产生非线性补偿, 根据电路拓扑结构, 利用 matlab 优化工具找到单频点处特定增益补偿和相位补偿特性的并联负载值, 改变频点, 并重复上述步骤, 可进一步得到特定增益和相位补偿所需的并联负载随频率的变化关系(即  $Z_L \sim f$  曲线)。利用 ADS 仿真软件优化设计使二极管后端阻抗随频率的变化逼近  $Z_L \sim f$  曲线。仿真的电路增益补偿和相位补偿分别为 6 dB 和  $-40^\circ$ 。最终实测频率范围为 9.4~11.4 GHz, 增益扩张在 3.9~4.4 dB, 相位补偿在  $-32.3^\circ \sim -41.5^\circ$ , 频带特性良好, 并且相对带宽达到了 19.2%。通过改变二极管直流偏置电压, 还实现了补偿曲线的斜率可调。

**关键词:** 模拟预失真; 增益扩张; 相位压缩; 固态功率放大器; 反射式预失真器

中图分类号: TN830.6

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220219

## Design method of reflective broadband predistorter for solid-state power amplifier

Sun Guanghui, Zhang Dewei, Deng Hailin, Lü Dalong, Zhou Dongfang, Bian Cheng

(PLA Strategic Support Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A design method for broadband reflective linearizer with specific gain and phase compensation is proposed, and a predistortion linearizer for solid-state power amplifiers is designed by this method. Nonlinear compensation is produced using the Schottky diode. The MATLAB optimization tool is utilized to calculate the shunt load's impedance at a single frequency point with the specified gain and phase compensation in accordance with the circuit topology. To obtain the variation of the shunt load with frequency necessary for a specific gain and phase compensation, i.e. the  $Z_L \sim f$  curve, the frequency point is changed, and the aforementioned procedures are repeated. The circuit is optimized using the ADS software so that the change in impedance of the diode's parallel load with frequency is approximated by the  $Z_L \sim f$  curve. The gain compensation and phase compensation of the circuit simulated in this paper are 6 dB and  $-40^\circ$ , respectively. The final measurement reveals that the frequency band characteristics are good when the frequency range is 9.4–11.4 GHz, the gain expansion is 3.9–4.4 dB, and the phase compensation is  $-32.3^\circ \sim -41.5^\circ$ . Additionally, the relative bandwidth of linearizer is 19.2%. By changing the DC bias voltage of the diode, the slope of the compensation curve is also adjustable.

**Key words:** analog predistortion, gain expansion, phase compression, solid-state power amplifier, reflective predistorter

随着无线和卫星通信的蓬勃发展, 对高效率 and 低失真特性的功率放大器的需求越来越多。为了满足现代通信对高速、大容量数据传输的需要, 充分利用频谱资源, 无线通信系统中广泛使用高阶调制技术。但是复杂的高阶调制会使信号产生很高的峰均比(PAPR), 容易让功率放大器进入到饱和区, 造成信号失真并产生带外干扰。功率放大器作为发射机的末级是影响信道线性度<sup>[1]</sup>的主要因素, 决定了发射机的质量和发射信号的完整性, 功放线性

\* 收稿日期: 2022-07-10; 修订日期: 2022-08-29  
基金项目: 国家自然科学基金项目(61871405)  
联系方式: 孙光辉, 2068857357@qq.com。  
通信作者: 张德伟, commbox666@163.com。

化技术也成为无线通信系统的核心技术之一<sup>[2-3]</sup>。

线性化技术主要有功率回退法<sup>[4]</sup>、反馈法<sup>[5-6]</sup>、前馈和预失真技术(模拟预失真和数字预失真<sup>[7-8]</sup>)。其中,模拟预失真技术具有低成本、宽频带、无条件稳定等优点,适合于微波、毫米波段<sup>[9]</sup>功放的线性化,一直是国内外学者研究的热点。固态功率放大器(SSPA)<sup>[10]</sup>的非线性特性表现为增益压缩和相位扩张,传统补偿固态功放的预失真器多使用传输式结构<sup>[11-12]</sup>,并且还需要在二极管旁并联电容以使线性化器的补偿特性适用于固态功放,过于追求大的非线性补偿量。然而在实际应用中,线性化器的增益和相位补偿量并不是越大越好,只有根据具体功放的特性,有目的地设计预失真电路非线性曲线,才能达到良好的线性化效果。

本文基于反射式结构<sup>[13]</sup>,利用二极管非线性特性提出一种实现特定增益和相位补偿的宽带线性化器设计方法,可以根据需要对固态功放的任意增益和相位补偿进行电路设计,加工实测了一种适用于X波段的模拟预失真器。该预失真器频率范围为9.4~11.4 GHz,相对带宽达到了19.2%。理论推导、电路仿真以及实际测试均显示,通过此方法设计的线性化器不仅宽带特性良好,而且具有结构简单、低成本、易于实现等优势。

### 1 电路基本原理及仿真设计

模拟预失真器是一个独立的电路单元,基本的设计思路是在功放前端放置预失真电路,产生与功放增益和相位失真互补的信号,再输入到SSPA中,以达到补偿功放非线性的目的。

#### 1.1 反射式预失真器原理分析

为了后续更好地进行电路设计,首先对反射式预失真电路进行理论分析。本文电路组成为三支线定向耦合器,肖特基二极管,以及50 Ω电阻和二阶阶梯匹配网络构成的负载 $Z_L$ 。电路模型如图1所示。

由3-dB电桥的S矩阵,可得出反射式结构的增益G和相移 $\phi$ 与单个支路的反射系数的关系为

$$G = 20 \lg |\Gamma| \quad (1)$$

$$\phi = \phi_\Gamma + 90^\circ \quad (2)$$

式中: $\Gamma$ 是电桥任意非线性支路的反射系数,并且 $\Gamma = |\Gamma|e^{j\phi}$ 。

肖特基二极管具有非线性特性,其阻抗变化取决于两端电压的变化。而当直流偏置电压一定加大输入信号功率会使二极管两端电压改变,进而导致二极管阻抗发生变化。并且输入信号从低功率到高功率变化的过程中,肖特基二极管阻抗的实部和虚部并不是线性变化的<sup>[14]</sup>,并且其等效电导 $G_d$ 和等效电纳 $B_s$ 都是输入功率的函数,等效电路如图1所示。电桥直通端口的传输矩阵可以表示为

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ G_d(p) + j * B_s(p) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_L & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ G_d(p) + j * B_s(p) + 1/Z_L & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据传输矩阵与阻抗矩阵的转换关系<sup>[15]</sup>,可以得到阻抗Z,即

$$Z(p) = \frac{1}{G_d(p) + j * B_s(p) + 1/Z_L} \quad (4)$$

直通端口的阻抗为 $Z_0$ ,进而可以得到,端口反射系数的表达式

$$\Gamma = \frac{Z(p) - Z_0}{Z(p) + Z_0} \quad (5)$$

通过以上的公式推导,可以发现整个电路的增益和相移与输入功率 $p$ 、负载 $Z_L$ 以及二极管有关。当并联负载 $Z_L$ 一定时,电路随输入功率变化的增益和相移就确定了。线性化器增益补偿和相位补偿可以表示为

$$\Delta G = 20 \lg |\Gamma_b / \Gamma_i| \quad (6)$$

$$\Delta \phi = \phi_{\Gamma_b} - \phi_{\Gamma_i} \quad (7)$$

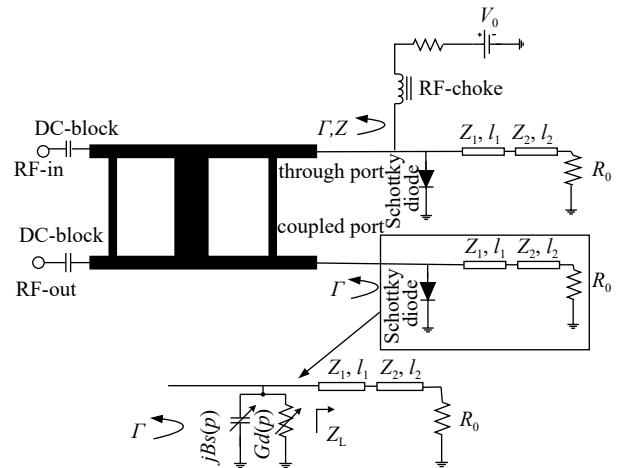


Fig. 1 Topology of predistortion circuit

图1 预失真电路拓扑结构

式中： $\Gamma_h$ 和 $\Gamma_l$ 分别为电路在大信号和小信号下的反射系数，且 $\Gamma_h = |\Gamma_h|e^{j\phi_h}$ ， $\Gamma_l = |\Gamma_l|e^{j\phi_l}$ 。

通过式子(3)~(7)，可以计算电路的增益和相位补偿。选定二极管的模型后，固定其偏置电压，其等效电导 $G_d$ 和电纳 $B_s$ 随着输入功率的变化就确定了。如果想要设计特定的增益和相位补偿量，可通过设计加载在二极管后端的负载 $Z_L$ 来实现。并且根据文献[14]的分析，改变二极管的偏置电压可以实现线性化器补偿曲线斜率的调节，增加了电路调节的灵活性。

### 1.2 新型宽带预失真线性化器设计

线性化器补偿量只有根据功放需要的指标有目的地设计电路，才能达到很好的补偿效果。经过上述原理分析，如果想要得到特定的增益和相位扩张，即找到对应的负载 $Z_L$ ，可以通过以下步骤确定：(1)给定预失真电路增益和相位补偿指标 $\Delta G = m$ 和 $\Delta\phi = n$ ，确定工作频率 $f_0$ ；(2)获取不同功率下二极管电导 $G_d$ 和电纳 $B_s$ ；(3)利用MATLAB求解负载 $Z_L$ ；(4)ADS设计电路拓扑结构；(5)电路的仿真及优化。

上述设计步骤，只能确定单频点 $f_0$ 下的负载值。当只确定增益扩张为 $m$ 时，通过上述步骤，可以得到单频点下一系列使增益扩张为 $m$ 的负载 $Z_L$ ，同理，当只确定相位压缩为 $n$ 时，可以得到一系列使相位压缩为 $n$ 的负载 $Z_L$ 。类似于功率放大器中的等增益圆和等噪声系数圆，可以在图2的Smith原图上得到预失真电路的等增益扩张和等相位扩张曲线。该曲线反映了不同负载阻抗下反射式预失真器的补偿特性，其中 $0 < m_1 < m_2 < m_3$ ， $n_3 < n_2 < n_1 < 0$ ，两种曲线的交点即为增益扩张 $m_i(i=1,2,3,\dots)$ ，相位压缩为 $n_j(j=1,2,3,\dots)$ 时的负载 $Z_L$ 。

上述阻抗曲线是在单频点下得出的，在实际应用中电桥的端口阻抗在宽频带内是随频率变化的，具体随频率如何变化，与所设计的电桥尺寸参数有关，所以在预失真电路的宽带设计过程中需要考虑电桥端口阻抗的因素。即便如此，Smith圆图上的曲线也说明了电桥端口阻抗确定后，实现增益扩张为 $m_i$ ，相位压缩 $n_j$ ，只有一个负载值与之对应。因此要想增加线性化器带宽，就必须确定电桥的尺寸后，找到在不同频率下，即不同电桥端口阻抗下，始终让预失真电路增益扩张为 $m_i$ ，相位补偿为 $n_j$ 的一系列负载值，即 $Z_L$ 在 $f_1 \sim f_2$ 频段内的阻抗变化，然后设计相对应的电路结构。

本文采用二阶阶梯阻抗匹配网络，最后连接50Ω电阻构成并联负载 $Z_L$ ，电路的拓扑结构如图3所示，使其随频率的阻抗变化满足求得的 $Z_L \sim f$ 曲线，根据传输线理论，从c点的阻抗 $Z_c$ 为

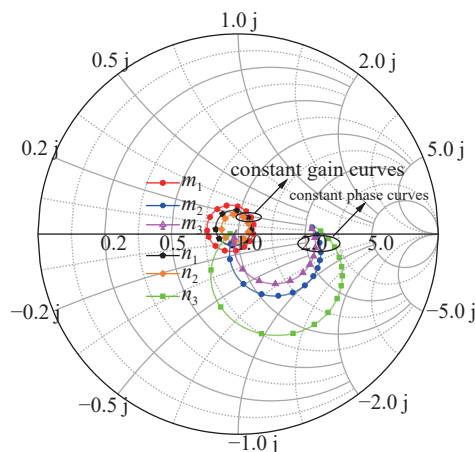


Fig. 2 Constant-gain and -phase compensation curves  
图2 等增益和相位补偿曲线

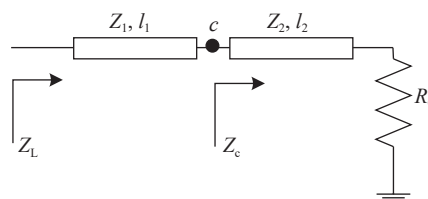


Fig. 3 Parallel load circuit model  
图3 并联负载电路模型

$$Z_c(f) = Z_2 \frac{R_0 + jZ_2 \tan\left(\frac{2\pi f}{v} l_2\right)}{Z_2 + jR_0 \tan\left(\frac{2\pi f}{v} l_2\right)} \quad (f \in (f_1, f_2)) \quad (8)$$

最终， $Z_L$ 随频率的阻抗变化为

$$Z_L(f) = Z_1 \frac{Z_c + jZ_1 \tan\left(\frac{2\pi f}{v} l_1\right)}{Z_1 + jZ_c \tan\left(\frac{2\pi f}{v} l_1\right)} \quad (f \in (f_1, f_2)) \quad (9)$$

式中： $Z_1, l_1, Z_2, l_2$ 为微带线的特性阻抗和物理长度， $v$ 为电磁波传输时的相速度， $R_0$ 为50Ω的电阻。

由式子(9)~(10)可知，负载随频率变化的曲线与两段微带线的长度，宽度以及终端电阻有关，即通过合理的参数调节，可以获得所需要的 $Z_L \sim f$ 曲线。

## 2 仿真与实验讨论

经过以上原理分析,以设计频段范围 9.4~11.4 GHz,二极管偏置一定时,预失真器增益补偿和相位补偿分别为 6 dB 和  $-40^\circ$  为例,该 APD 的介质板为 Rogers 5880,介电常数为 2.2,厚度为 0.254 mm。肖特基二极管使用 MA4E2037,确定分支电桥的尺寸后,借助 ADS 软件进行优化,二阶梯阻抗网络在频点 10 GHz 时各个参数为  $Z_1=43.18 \Omega$ ,  $l_1=3.43$  mm,  $Z_2=53.88 \Omega$ ,  $l_2=4.15$  mm,电路在 ADS2017 上进行仿真。

图 4 为在 9~11.4 GHz 频段预失真器始终增益扩张 6 dB,相位扩张  $-40^\circ$  时负载随频率的变化,以及所设计的电路拓扑阻抗随频率的变化,可以看到在频率为 9.4~11.4 GHz(绝对带宽为 2 GHz,相对带宽为 19.2%)时负载阻抗的实部和虚部都和理想负载变化曲线拟合较好,即频段内增益扩张和相位压缩波动较小。

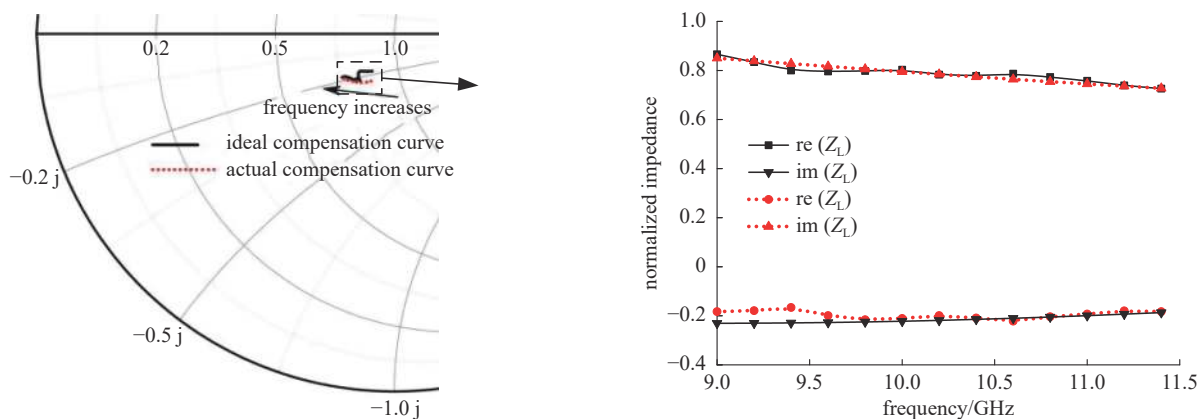


Fig. 4  $Z_L$ - $f$  curve under constant gain and phase compensation

图 4 等固定增益和相位补偿下  $Z_L$ - $f$  曲线

图 5 仿真曲线反映了预失真电路偏置电压  $V_{cc}$  固定时,在 9.4~11.4 GHz 的补偿特性,增益扩张在 5.4~5.9 dB 之间,波动范围仅有 0.5 dB,同理,相位补偿在  $-39.4^\circ \sim -47.5^\circ$ ,波动范围仅为  $8.1^\circ$ 。综上所述,用所提出的宽带线性化器设计方法设计的电路,增益和相位补偿随频率变化较小,并且在宽频带内能实现想要的增益和相位补偿。

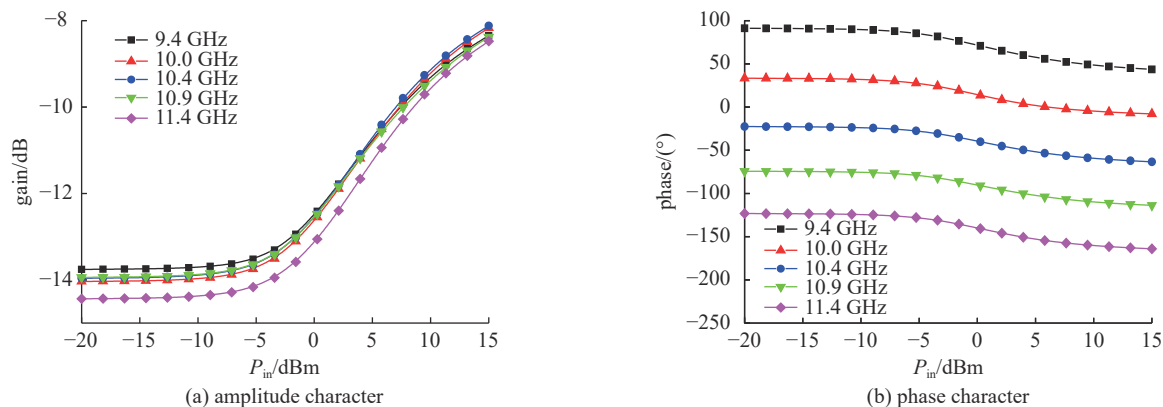


Fig. 5 Simulation compensation curve of the predistorter at different frequencies

图 5 不同频率下预失真器的仿真补偿曲线

图 6 仿真曲线显示了频率为 10 GHz 时改变肖特基二极管偏置电压  $V_{cc}$ ,模拟预失真器电路的增益和相位补偿相应的变化,并且增益和相位补偿曲线的斜率变化明显,增加了电路的可调性,方便对固态功放进行精确补偿。

使用是德科技矢量网络分析仪 N5244A 对仿真线性化器进行实物加工和测试。测试时,在预失真电路前加驱动放大器,在测试频段内驱动放大器增益为 10 dB,电路实物和连接测试如图 7 所示。图 8 为实际测试结果,在输入功率区间  $-25 \sim 5$  dBm 上,工作频带内的增益扩张范围为 3.9~4.4 dB,相位压缩为  $-32.3^\circ \sim -41.5^\circ$ ,所测得的线性化器宽带特性良好。

仿真和实测结果不完全相同,主要原因是二极管建模不准确,加工焊接引入的误差等。但是测试和仿真结果都表明,设计的预失真电路频带特性良好,进一步验证了所提出的宽带线性化器设计方法的正确性,即通过设计与

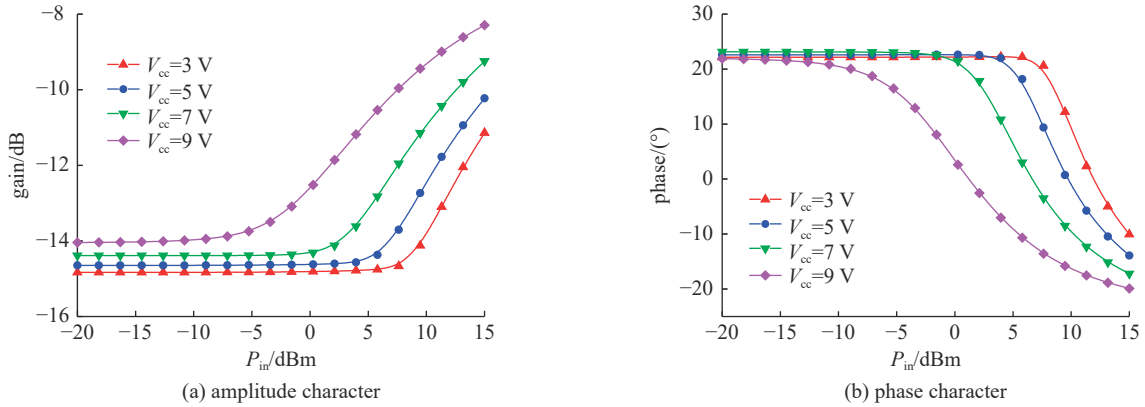


Fig. 6 Simulation compensation curve of predistorter under different  $V_{cc}$  biases at 10GHz

图 6 在 10 GHz 时不同偏置电压  $V_{cc}$  下预失真器仿真补偿曲线

二极管并联的负载随频率变化拟合所得到的  $Z_L \sim f$  曲线, 可实现特定增益和相位补偿的宽带线性化器。

### 3 结论

本文根据在肖特基二极管旁并联不同负载能获得不同增益和相位补偿的特性, 分析了其原理, 并提出了一种特定增益和相位补偿宽带预失真器设计方法, 通过此方法可获得任意增益和相位补偿的组合, 可以根据放大器的失真情况进行电路结构设计。本文利用此方法设计了一种适用于 X 频段固态功率放大器的宽频带模拟预失真器, 电路采用反射式结构, 比传统的传输式结构输入驻波好, 降低了预失真器对整个系统带来的不稳定因素。通过调节二极管的偏压, 实现曲线斜率的调节, 增加了电路的可调性, 有利于功放的精确补偿。预失真器的带宽为 2 GHz, 相对带宽为 19.2%, 通过设计更加复杂阻抗网络精确拟合  $Z_L \sim f$  曲线, 电路的工作带宽将会进一步拓展。该电路在工作频段内增益扩展和相位压缩一致性好, 波动很小。并且采用该方法设计的电路结构简单、成本低、易于实现, 具有良好的工程应用价值。

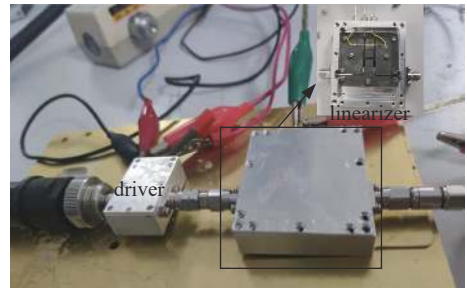


Fig. 7 Photograph of the linearizer

图 7 线性化器实物图

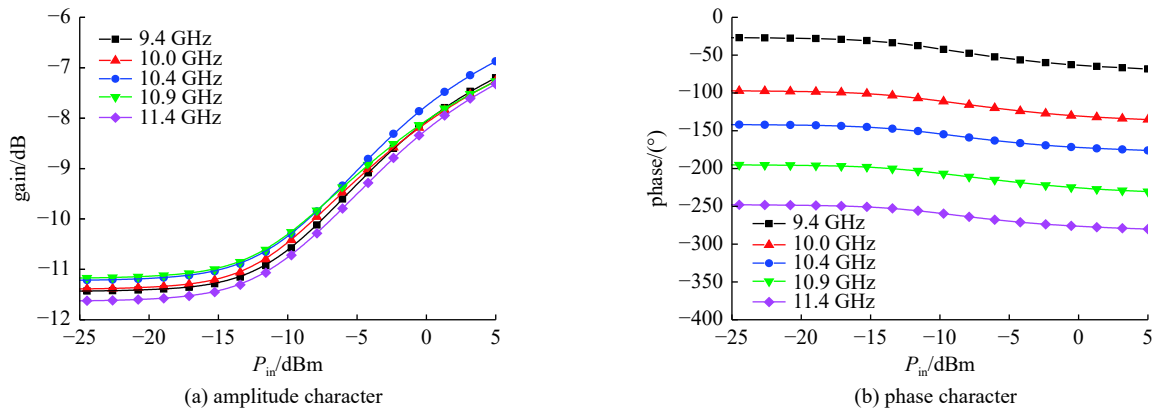


Fig. 8 Measured predistortion circuit results

图 8 预失真电路实际测试结果

### 参考文献:

- [1] 郝鹏. 面向5G的功放线性化技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021: 1-10. (Hao Peng. Research on linearization technology of power amplifier for 5G applications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 1-10)
- [2] Hao Peng, He Songbai, You Fei, et al. Broadband linearizer based on equivalent power-dependent impedance function of diode and load match network[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(2): 499-503.
- [3] Deng Hailin, Zhang Dewei, Lv Dalong, et al. A tunable reflective analog predistorter based on variable impedance matching network[J]. *AEU-International*

- Journal of Electronics and Communications, 2019, 98: 139-143.
- [4] Katz A. Linearization: reducing distortion in power amplifiers[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2001, 2(4): 37-49.
- [5] Li Jinbo, Shu Ran, Xu Zhiwei, et al. A 21-dm-OP<sub>1dB</sub> 20.3%-efficiency-131.8-dBm/Hz-noise X-band Cartesian error feedback transmitter with fully integrated power amplifier in 65-nm CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2020, 55(6): 1491-1501.
- [6] Borel A, Barzdénas V, Vasjanov A. Linearization as a solution for power amplifier imperfections: a review of methods[J]. *Electronics*, 2021, 10: 1073.
- [7] Brihuega A, Anttila L, Valkama M. Frequency-domain digital predistortion for OFDM[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2021, 31(6): 816-818.
- [8] Ginzberg N, Gidoni T, Schwartz Y, et al. Wideband linearization of a carrier aggregation transmitter using analog signal injection and 2-D digital predistortion[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(6): 2030-2040.
- [9] Katz A, Gray R, Dorval R. Linearizers for Q- and V-band TWTAs[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(6): 2371-2377.
- [10] Bian Cheng, Zhang Dewei, Deng Hailin, et al. A reconfigurable analog predistorter using tunable impedance matching network[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2020, 125: 153384.
- [11] Liu Zheng, Yan Cheng, Liu Gang, et al. A novel analog linearizer for solid-state power amplifier in satellite communication system[C]//2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Chengdu: IEEE, 2018: 1-3.
- [12] 王崇, 杨志国. Ka频段氮化镓功放的预失真线性化器设计[J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26(1): 252-255. (Wang Chong, Yang Zhiguo. Design of Pre-distortion linearizer for GaN power amplifier at Ka-band[J]. *Computer Measurement & Control*, 2018, 26(1): 252-255)
- [13] Karimzadeh Bae R, Rahati Belabad A, Moazzen H, et al. A novel analog predistortion linearizer based on a Schottky diode for communication applications[J]. *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations*, 2022, 10(1): 101-106.
- [14] 邓海林, 陈会超, 周东方, 等. 一种补偿量可调的反射式预失真线性化器[J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(8): 657-662. (Deng Hailin, Chen Huichao, Zhou Dongfang, et al. Design and evaluation of modified reflective predistortion linearizer with tunable compensation[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(8): 657-662)
- [15] Pozar D M. Microwave engineering[M]. Hoboken: Wiley, 2005.