

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105731

一种基于回波注入的贝叶斯行为模型提取方法*

杨保国¹ 苏江涛² 王健华² 王飞² 蔡佳林²

(1.电子测试技术重点实验室 青岛 266000; 2.杭州电子科技大学 射频电路与系统教育部重点实验室 杭州 310018)

摘要: 测试速度是制约现有射频器件行为级模型走向实用化的重要因素之一。针对该问题,提出了一种新颖的基于回波注入的方法提取非线性贝叶斯推理行为级模型。该方法在测试过程中改变负载端口入射波的幅值和相位,获得不具备相关性的大量训练数据集。通过该方法,无需进行完整的负载牵引测试,就可以获得准确的器件非线性行为级模型。对实际氮化镓器件在2 GHz进行了测试,在不影响模型提取精度的前提下,在极短时间内即可获得模型训练数据集,极大地提高了提取速度,具备很强的实用性。

关键词: 行为级模型;贝叶斯推理;负载牵引;非线性

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

A reverse wave based method enabling rapid extraction of Bayesian inference-based behavioral model

Yang Baoguo¹ Su Jiangtao² Wang Jianhua² Wang Fei² Cai Jialin²

(1.Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory,Qingdao 266000,China;

2.Key Laboratory of RF Circuits and Systems, Ministry of Education, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018,China)

Abstract: Measurement speed is a key fact that limited the practical application of RF device behavior model. A novel rapid extraction method based on reverse wave injection is proposed. This method changes the amplitude and phase of the reverse incident wave at the load side of the device under test, so that massive training data can be acquired for the Bayesian algorithm, without the need for a complete load-pull test. Experiment is conducted over a GaN device at 2 GHz frequency, the results prove that the method has greatly increase the extracting speed without compromising the accuracy. Compared with the traditional scheme, this method can greatly improve the model extracting efficiency and can be widely applied in practice.

Keywords: behavior model; Bayesian inference; load-pull; nonlinear

0 引言

随着5G时代的到来,射频功率器件应用日益广泛,复杂性日益增加^[1-3]。射频电路的成功设计主要依赖于模型的精准度^[4],而随着射频系统复杂性提升,对模型精度和收敛速度的要求也进一步提高。传统器件模型通常由一系列模拟器件端口电流、电荷/电容和端口偏压依赖性的数学方程,和表征器件电气行为的拓扑结构组成^[5-6]。然而随着新型宽禁带半导体材料的广泛应用,紧凑型模型结构复杂、模型参数多、迭代开发时间长已成为制约高效射频电路设计的瓶颈^[7]。

近年来行为级模型受到了越来越多学者的关注。此类模型的开发者无需知道器件工作机理、相应的工艺信息,以

及器件行为随端口激励条件、温度等外部环境的可变性晶体管的非线性行为级模型有助于非线性器件的设计和器件的表征,大大降低了设计的复杂度^[8-9]。在行为级模型中,被建模的器件可视为一个黑匣子,即不需要了解器件的内部结构及工作原理,建模信息完全包含在器件的响应中。

随着机器学习在人工智能领域有着广泛的应用,近年来被应用于射频电路的行为级建模。文献[9]介绍了一种基于神经网络的行为级模型建模方法,在对实际氮化镓(Gallium nitride, GaN)器件建模中取得了良好的效果。文献[10]进一步介绍了一种基于贝叶斯推理的行为建模方法,该方法具有很强的处理多维建模问题的能力,进一步拓展了行为级模型对多种半导体器件的表征能力。同时,这种贝叶斯行为级模型也被成功的应用至了宽带射频功率放

收稿日期:2021-01-23

* 基金项目:国家自然科学基金(61827806,61871161)、安徽省自然科学基金(1908085MF220)项目资助

• 76 •

大器设计中^[11]。

然而,尽管行为级模型已成为业界研究的热点,但这种模型方法也存在一个明显的问题,即需要依赖负载牵引测试获得的海量数据集来提取模型^[12];而负载牵引测试一方面耗时较长,另一方面测试平台复杂,难以简单获取精准测试数据^[13-14]。尽管近年来已有研究提出了快速负载牵引测试校准方法以缩短测试系统校准时间^[15],但测试本身用时依然较长,这大幅度限制了行为级模型在电路设计过程中的应用。

针对这一问题,本文开创性的提出了一种基于回波注入的快速贝叶斯推理行为级模型提取算法。采用这种算法,在获取行为级模型训练数据时,只需改变负载端回波的矢量值即可。由于无需进行完整的负载牵引测试,省去了阻抗迭代的过程和繁琐的校准步骤,大大提高了建模效率。

本文的结构如下:首先介绍了贝叶斯行为级模型的基本理论和基于回波注入的模型提取方法;然后介绍了用于获取训练数据的测试系统架构,并对本文提出的算法进行了验证。

1 功率器件测试与贝叶斯算法基本理论

1.1 贝叶斯行为级模型

功率晶体管通常工作在共源模式,这可以看作是一个双端口器件。每个端口的入射波 $A_{q,n}$ 及散射波 $B_{p,m}$ 与端口电流和电压的关系可用式(1)和(2)表示。

$$A_{q,n} = \frac{V_{q,n} + Z_0 I_{q,n}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (1)$$

$$B_{p,m} = \frac{V_{p,m} - Z_0 I_{p,m}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (2)$$

其中, p 和 q 分别代表入射波和反射波所在的端口号; n 和 m 代表谐波次数; Z_0 表示系统的特征阻抗^[11]。

由此,晶体管器件的行为级模型可以视作求一组特定的函数 $F_{p,m}$ 。这样当每个端口的入射波已知时,就可以用 $F_{p,m}$ 函数计算相应的散射波。这种关系可用式(3)表示。

$$B_{p,m} = F_{p,m}(A_{1,1}, A_{1,2}, \dots, A_{1,N}, A_{2,1}, A_{2,2}, \dots, A_{2,M}) = F_{p,m}(\widehat{A_{q,n}}) \quad (3)$$

可以使用贝叶斯理论来找到这组特定的函数 $F_{p,m}$, 它可以用来获得每个端口的散射波及其谐波分量,并且不需要知道晶体管的具体物理结构和工作特性。但贝叶斯公式是针对实值定义的,晶体管的散射参数都是复数。因此,需要对散射参数稍加修改。在本文中,采用了实值时域神经网络建模技术,从而使器件的反射波可以表示为入射波实部和虚部的函数。并且所有描述函数还应该写成一组非线性基函数的线性组合,使其可以与贝叶斯技术相结合。因此,它可以写成:

$$B_{p,m} = F_{p,m}(\widehat{A_{q,n}}; \mathbf{w}) = \sum_{i=0}^k \mathbf{w}^T \phi(\widehat{A_{q,n}}) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_i)$ 代表向量权重,在 $F_{p,m}$

参数列表中添加的权值向量表示描述函数对模型参数的依赖关系。 $\phi(\widehat{A_{q,n}})$ 表示一系列的非线性基函数。

首先将权向量分配给一个先验概率函数,表示为 $p(\mathbf{w})$,也就是在没有获取训练数据 D 之前的概率。根据贝叶斯理论,后验概率密度函数 $p(\mathbf{w} | D)$ 可以表示为:

$$p(\mathbf{w} | D) = \frac{p(D | \mathbf{w})p(\mathbf{w})}{p(D)} \quad (5)$$

从上述公式中可以看出,边际似然函数 $p(D)$ 可以看作一个定值,不用于决定条件概率。因此可以认为后验概率密度函数 $p(\mathbf{w} | D)$ 与 $p(D | \mathbf{w})p(\mathbf{w})$ 成正比。为了寻找最佳的模型拟合函数,需要选择产生正确的模型函数的概率最大的权值。因此可以通过最大后验(MAP)方法来选择基于测试数据的最优权值,也就是通过最大化 $p(D | \mathbf{w})p(\mathbf{w})$ 的值。MAP 可以很容易的通过最小化负对数函数得到:

$$-\ln p(D | \mathbf{w})p(\mathbf{w}) \quad (6)$$

通过公式也可以看出,选择合适的概率密度函数来描述先验分布和似然分布在贝叶斯算法中起着至关重要的作用,比如正态分布的高斯概率密度函数、指数分布的概率密度函数。本文选择了一个多维正态分布的概率密度函数用于描述式(6)中的 $p(\mathbf{w})$:

$$p(\mathbf{w}) = N(\mathbf{w} | 0, \alpha^{-1}) = \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{\alpha}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w}\right] \quad (7)$$

式(6)中的似然函数 $p(D | \mathbf{w})$ 可以写成一组独立且同分布的概率分布的乘积:

$$p(D | \mathbf{w}) = \prod_{i=1}^K N(B_{q,n}^i | F_{p,m}(\widehat{A_{q,n}}^i; \mathbf{w}), \beta^{-1}) = \prod_{i=1}^K \left(\frac{\beta}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{\beta}{2}(B_{q,n}^i - \mathbf{w}^T \phi(\widehat{A_{q,n}}^i))^2\right] \quad (8)$$

因此通过使用 MAP 方法, $p(D | \mathbf{w})p(\mathbf{w})$ 的最大值可以通过取下式最小值得到:

$$-\frac{\beta}{2} \sum_{i=1}^K (B_{q,n}^i - \mathbf{w}^T \phi(\widehat{A_{q,n}}^i))^2 + \frac{\alpha}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} \quad (9)$$

综上所述,基于贝叶斯推理理论的模型构建方式就是选择适当的概率密度函数描述权向量 $p(\mathbf{w})$ 及似然函数 $p(D | \mathbf{w})$, 并通过实际测量数据得到 $p(D)$, 即可通过贝叶斯公式得到更新概率分布 $p(\mathbf{w} | D)$, 通过最大化 $p(\mathbf{w} | D)$ 来选择最优权重即基于测试数据的模型参数。

1.2 基于测试数据的快速模型提取方法

为了获得贝叶斯推理行为级模型,需要通过相应的测试得到一系列的训练数据,从而得到器件的入射波和散射波之间的关系。测试得到的 K 组训练数据可以表示为式(10):

$$D = \bigcup_{i=1}^K \left\{ \frac{B_{p,m}^i}{A_{q,n}^i} \right\} \quad (10)$$

传统上,需要利用如图 1 所示的负载牵引系统来获得

这一系列的测试数据。然而,要想使用负载牵引测试系统获得准确的测试数据,必须要对整个测试系统进行校准。校准的步骤包括^[16]:

- 1) 由于负载阻抗调配器是一种机械结构装置,对环境温度和机械连接结构都非常敏感,因此在开始测试之前,需要对 Tuner 进行校准。
- 2) 要根据 8 误差系数或者 16 误差系数模型,对测试系统进行小信号矢量校准。
- 3) 为了完成大信号功率测试,还需要对测试端口进行功率校准。

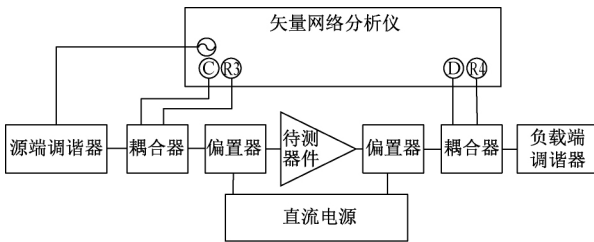


图 1 负载牵引测试系统

上述校准过程,极为冗长繁琐,耗时久,测试精度难以保证。考虑到式(10)只包括了 $A_{2,1}$ 和 $B_{2,1}$,并未包括系统阻抗 $A_{2,1} / B_{2,1}$,因此可以采用基于反向回波注入的方式对器件进行测试获取训练集。图 2 所示为测试系统负载端的结构。在测试过程中,只需改变装置负载端入射波 $A_{2,1}$ 的振幅和相位,即在负载端附加一台信号发生器,并改变输出信号 $A_{2,set}$ 的振幅和相位,将源端和负载端的散射波信号记录下来作为训练集。该过程无需将负载牵引测试包括在内,从而省去了负载牵引测试的冗长阻抗迭代和校准过程,可以有效地提高建模效率。

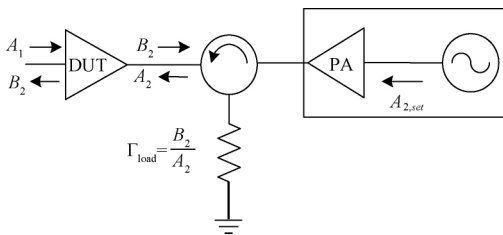


图 2 测试系统负载端结构

2 实验验证

2.1 测试系统设置

为了验证本文所提出的新型行为级模型提取算法的有效性,进行了实际测试。采用的测试系统及其框图分别如图 3 和 4 所示。在本测试系统中,利用 ESG (Keysight 8267D)、PA 和环行器构成有源阻抗调配器,将 ESG 的输出信号经 PA 放大后作为器件输出端口的入射波。源端使用矢量网络分析仪端口 3 的输出信号通过 PA 作为器件源端的入射波。两侧的高精度耦合器用于测量装置的入射波和散射波。偏置器连接到直流电源用以施加直流偏置。矢

量网络分析仪为中电科仪器仪表公司的 AV3672 型。测量系统整体采用^[17]中介绍的增强型 TRM 校准方法进行校准。

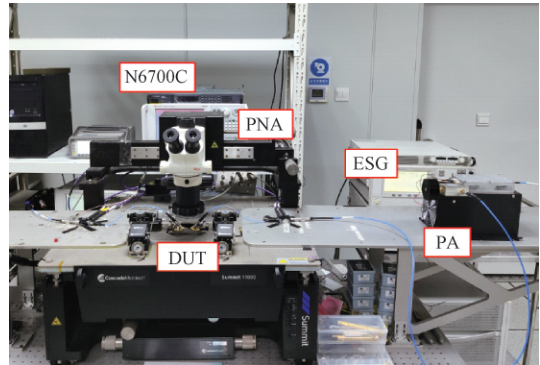


图 3 实际测试系统实物

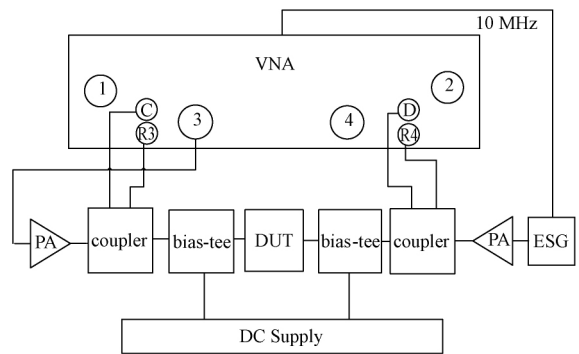


图 4 测试系统拓扑结构

2.2 实验结果

为了验证该行为级模型算法的准确性,选择了一个 $10 \times 60 \mu\text{m}$ 的 GaN HEMT 器件进行负载牵引测试,用于获取训练数据建立贝叶斯模型。本文选择的偏置条件为 $V_{GS} = -2.5 \text{ V}$, $V_{DS} = 28 \text{ V}$, 频率为 2 G 。在固定入射波不变的情况下,如图 5 所示,改变负载端 ESG 输出,也即回波 A_{21} , 的幅度和相位获得 240 个负载点的测试数据。然后再另选几个 A_{11} 值重复上述操作,用于完善训练数据。基于该训练数据,利用贝叶斯理论建立贝叶斯模型后进行了仿真,并与实际测试结果进行了对比。

在进行仿真实验验证时,首先将器件的负载阻抗设置为 50Ω 并保持不变,改变 A_{11} 的幅度和相位,验证该算法的对于 A_{11} 的插值能力。仿真结果如图 6 所示,随着器件输入功率的增大,功率放大器的响应 B_{21} 逐渐由圆形变为了不规则椭圆,表示器件进入了非线性区。通过对比可发现,贝叶斯模型的散射波与测试数据具有很好的一致性,说明该模型对于 A_{11} 具有良好的插值能力。

然后根据器件的 $P1 \text{ dB}$ 压缩点选择输入功率,并保持不变。改变 ESG 输出功率的幅度和相位,观察 B_{21} 大小,验证该模型对于 A_{21} 的插值能力。将仿真结果与测试结果进行对比,如图 7 所示,结果显示了较好的预测能力。同时

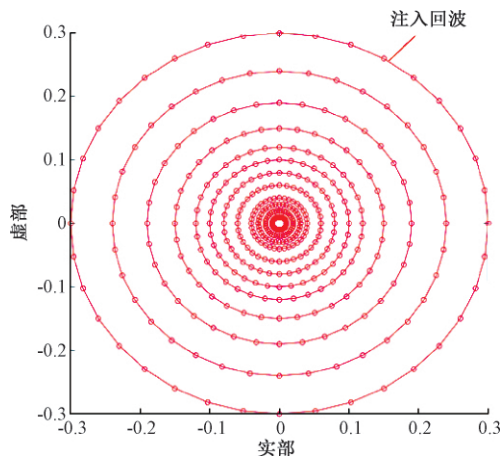


图 5 训练贝叶斯模型的 A_{22} 回波值

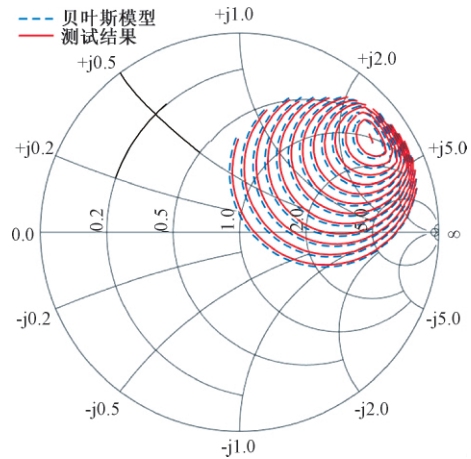


图 8 贝叶斯模型与测试数据的输出功率圆图对比

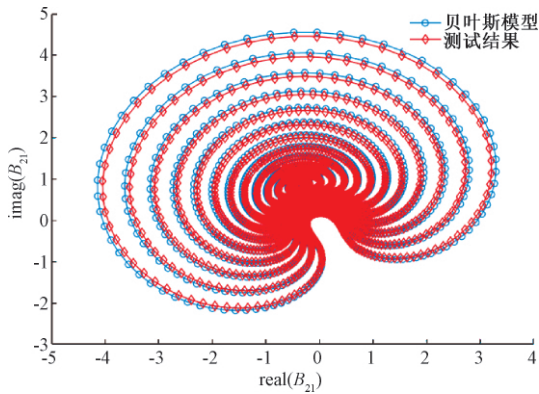


图 6 不同 A_{11} 贝叶斯模型仿真结果与测试结果对比

也对比了输出功率圆图,如图 8 所示,该模型可以准确估计最大输出功率阻抗点,这对于 PA 的设计者来说是非常重要的。

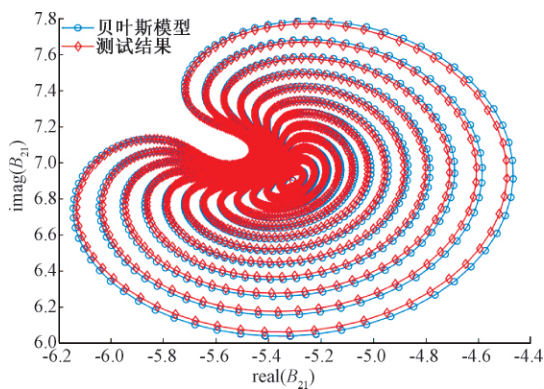


图 7 不同 A_{21} 贝叶斯模型仿真结果与测试结果对比

在行为级模型保持了良好的精度的同时,测试总用时仅耗时 $12(\text{功率点}) \times 240(\text{回波数}) \times 0.5 \text{ s} = 24 \text{ min}$ 。相对于传统行为级模型动辄数小时的建模时间^[18],有了极大进步。这进一步说明了该方法的有效性。

3 结 论

本文提出了一种基于回波注入的贝叶斯行为级模型建立方法。该方法通过改变负载端口处入射波的幅值和相位进行测试,即可获取海量训练数据。与传统负载牵引方法相比,用时大大缩短,在不影响模型精度的情况下,极大地提高了建模效率。并且经过实验验证,该模型可以准确的预测器件在整个史密斯圆图上的行为,并且对于器件输入功率也具有很好的插值能力。

实际上,本文提出的方法,具有较大的一般性,亦可应用到其他诸如多项式为级模型,神经网络行为级模型等模型提取中。下一步的工作,将着重于探究更有效的回波注入方法,用尽量少的训练集,获得精度损失较小的行为级模型,进一步缩短建模需要的时间。

参考文献

- [1] 洪伟,余超,陈继新,等.5G 及其演进中的毫米波技术[J].微波学报,2020,36(1):12-16.
- [2] 张黎明.毫米波 5G NR 信号 OFDM 技术研究与实现[J].电子测量技术,2020,43(22):146-149.
- [3] TUO T, TERVO N, PARSSIEN A. Analyzing 5G RF system performance and relation to link budget for directive MIMO[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017,65:6636-6645.
- [4] PETER A, JAIME P, JOHN W. Modeling and characterization of RF and microwave power FETs[M]. Cambridge University Press,2007.
- [5] 孟畅.大功率半导体器件非线性电路模型研究[D].西安:西安电子科技大学,2019.
- [6] DAVID E R. Future device modeling trends[J]. IEEE Microwave Magazine, 2012:45-59.
- [7] ZHANG L, ZHANG Q J, WOO D J, et al. Statistical neuro-space mapping technique for large-signal modeling of nonlinear devices [J]. IEEE Transactions on Microwave

- Theory and Techniques, 2008, 56: 2453-2467.
- [8] HUANG AN D, ZHONG ZH, WU W, et al. An artificial neural network-based electrothermal model for GaN HEMTs with dynamic trapping effects consideration[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(8): 2519-2528.
- [9] CAI J L, KING J, YU CH, et al. Support vector regression based behavioral modelling technique for RF power transistors[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(5): 428-430.
- [10] CAI J L, KING J B, SU J T, et al. Bayesian inference-based behavioral modeling technique for GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(6): 2291-2301.
- [11] CHEN S, WANG W, ZHAO P, et al. Wide-band/multi-band doherthy and outphasing power amplifier designs[J]. 2019 European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE), Prague, Czech Republic, 2019: 204-207.
- [12] WELKER R, OZEV S, KITCHEN J. Incorporating RF test measurements for efficient design flow of GaN-based power amplifiers [J]. 2018 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR), Anaheim, CA, 2018: 69-71.
- [13] GHANHOUCOI F M, HASHMI M S. Load-pull techniques and their applications in power amplifiers design[C]. IEEE bicmos Circuits & Technology Meeting, IEEE, 2011: 133-137.
- [14] 刘俊杰, 李富国, 魏德宝, 等. 微波组件自动测试系统研制[J]. 电子测量技术, 2020, 43(18): 162-168.
- [15] 苏江涛, 郭庭铭, 杨保国, 等. 基于回波替代的毫米波矢量网络测试校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 77-84.
- [16] HASHMI M S, GHANHOUCOI F M. Introduction to load-pull systems and their applications [J]. Instrumentation & Measurement Magazine IEEE, 2013, 16(1): 30-36.
- [17] 郭庭铭, 苏江涛, 刘军, 等. 宽带矢量网络测试的 TRM 校准方法不确定度分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 79-85.
- [18] WANG Y, JENSEN O K, LARSEN T. GaN HEMT device modeling using X-parameters with emphasis on complexity reduction of harmonic load-pull measurement [C]. 2015 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania, 2015: 1-6.

作者简介

杨保国, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波测试技术。

E-mail: 18661758942@163.com

苏江涛, 博士, 副教授, 主要研究方向为射频/毫米波测试技术、射频器件建模以及功率放大器设计。

E-mail: jtsu@hdu.edu.cn