

# 去嵌入技术在驻波优化中的应用与研究

刘敏雪

成都市茶店子429信箱 四川 成都 610000

**摘要:** 通过探讨去嵌入技术在驻波优化中的应用与研究,介绍了去嵌入技术的基础理论,包括其概述、与矢量网络分析仪的紧密关系以及常见方法。接着阐述了驻波的基本原理和优化方法。重点分析了去嵌入技术在驻波优化中的作用机制,包括提升测量精度、影响特性分析以及优化策略制定。详细说明了去嵌入技术在驻波优化中的具体方法与实施步骤,如算法选择、测试系统校准与模型建立及实施流程。本文为驻波优化提供科学的技术途径。

**关键词:** 去嵌入技术; 驻波优化; 应用

**引言:** 在微波射频系统中,驻波现象对信号传输效率和系统稳定性有着重要影响。为了准确获取被测对象的驻波特性,必须消除测试系统引入的干扰。去嵌入技术作为一种关键手段,能够有效提升驻波测量的精度,为驻波优化提供可靠数据基础。本文旨在深入探讨去嵌入技术在驻波优化中的应用,介绍其基础理论、作用机制及具体实施方法,为相关领域的研究和工程实践提供参考。

## 1 去嵌入技术基础理论

### 1.1 去嵌入技术概述

去嵌入技术是现代电子测量与分析领域中用于精确获取被测对象真实特性的关键技术。在各类电子系统测试过程中,测试系统本身并非理想状态,诸如测试夹具、连接线缆等元件会引入额外的反射与损耗,这些非理想因素严重干扰对被测对象的准确测量。去嵌入技术应运而生,它通过特定的算法和方法,致力于将这些测试系统带来的干扰从测量数据中去除,进而还原被测对象的真实电学特性。例如在射频电路测试里,测试夹具的寄生参数会使测量结果偏离实际电路性能,去嵌入技术则能精准剔除这些干扰,让工程师得以获取电路的真实参数。其核心目标在于提升测量的准确性,为后续的设计优化、故障诊断等工作提供可靠的数据支撑,在通信、电子设备制造等众多对高精度测量有需求的领域发挥着不可或缺的作用。

### 1.2 矢量网络分析仪与去嵌入技术

矢量网络分析仪作为一种广泛应用于射频与微波领域的精密测量仪器,与去嵌入技术紧密相连。它能够精确测量网络的散射参数,全面表征被测对象的传输和反射特性。在实际测量时,矢量网络分析仪所获取的数据包含了被测对象以及测试系统引入的综合信息。而去嵌入技术正是借助矢量网络分析仪测量的这些数据,通过

特定的算法流程,将测试系统的影响从原始测量结果中分离出来。例如,矢量网络分析仪在测量天线驻波特性时,会同时测量到天线自身以及连接天线与分析仪的线缆、转接器等引入的反射和损耗。运用去嵌入技术,利用矢量网络分析仪测量已知标准件(如短路、开路、负载等)获取的校准数据,构建测试系统的模型,从而能够从天线测量数据中去除测试系统的干扰,得到天线真实的驻波特性。矢量网络分析仪为去嵌入技术提供了数据来源,而去嵌入技术则拓展了矢量网络分析仪的测量精度和应用范围,两者相辅相成,共同推动电子测量技术的发展<sup>[1]</sup>。

### 1.3 去嵌入技术的常见方法

去嵌入技术包含多种常见方法,以满足不同场景下的应用需求。直通-反射-线(TRL)算法是高精度去嵌入的常用手段,它通过对直通、反射和传输线等标准件的测量,精确校准测试系统,能够有效消除测试夹具、线缆等引入的误差,适用于对测量精度要求极高的场合,如芯片级射频电路的测试。短路-开路-负载-直通(SOLT)算法则相对操作简便,通过测量短路、开路、负载和直通标准件,获取测试系统的误差模型,进而对测量数据进行去嵌入处理,在一些对成本和操作便捷性有要求的一般性测试中广泛应用。还有全二端口去嵌入方法,它基于二端口网络理论,能够对更为复杂的测试系统进行去嵌入操作,可处理多个非理想因素同时存在的情况,在多端口网络或复杂微波组件的测试中发挥重要作用。这些常见方法各有特点,工程师可依据具体的测试需求、测试系统复杂度以及对测量精度的要求,灵活选择合适的去嵌入方法,以实现对被测对象真实特性的准确获取。

## 2 驻波优化原理与方法

### 2.1 驻波基本原理

驻波是微波射频系统中常见的一种现象，它是由电磁波在传输过程中遇到阻抗不匹配或反射面时，部分电磁波被反射回去，与前行波相互叠加而形成的。驻波的存在会导致信号传输效率的降低，严重时甚至可能损坏微波器件。驻波的特性通常用驻波比（VSWR, Voltage Standing Wave Ratio）来衡量，驻波比越大，表示反射波越强，驻波现象越明显。在微波射频系统中，驻波的产生往往与传输线的阻抗不匹配有关。当传输线的特性阻抗与负载阻抗或源阻抗不匹配时，电磁波在传输过程中会发生反射，形成驻波。另外，传输线中的不连续性、接头、弯曲等也会导致驻波的产生，要优化驻波，就需要从阻抗匹配和消除传输线中的不连续性入手<sup>[2]</sup>。

## 2.2 驻波优化方法

针对驻波的优化，主要有以下几种方法：（1）阻抗匹配：通过调整负载阻抗或源阻抗，使其与传输线的特性阻抗相匹配，从而减少电磁波的反射，降低驻波比。阻抗匹配可以通过使用匹配网络、调整天线长度或位置等方式实现。（2）消除传输线中的不连续性：传输线中的接头、弯曲等不连续性是导致驻波产生的重要原因之一。可以通过优化传输线的设计，减少不连续性的数量或改善其形状，来降低驻波比。例如，使用平滑的弯曲代替急剧的弯曲，或采用高质量的接头来减少反射。（3）使用吸波材料：在微波射频系统中，可以在适当的位置使用吸波材料来吸收反射波，从而降低驻波比。吸波材料能够吸收电磁波的能量，将其转化为热能或其他形式的能量，从而减少反射波对系统的影响。

## 3 去嵌入技术在驻波优化中的作用机制

### 3.1 去嵌入技术对驻波测量精度的提升

在传统的驻波测量过程中，测试系统本身存在诸多非理想因素，这些因素极大地干扰了驻波测量的准确性。测试夹具的寄生电容和电感、连接线缆的损耗以及阻抗不匹配等问题，都会导致测量结果偏离真实的驻波特性。而去嵌入技术能够有效解决这些问题，显著提升驻波测量精度。通过对测试系统进行精确校准，去嵌入技术可以获取测试系统的详细误差模型。例如，利用直通-反射-线（TRL）等校准方法，测量已知标准件（如短路、开路、负载）的响应，从而精确确定测试系统的传输和反射特性。基于这些校准数据，去嵌入算法能够从原始测量数据中分离出测试系统引入的误差，得到更为准确的驻波测量结果。实验数据表明，在未采用去嵌入技术时，驻波比测量误差可能高达 $\pm 10\%$ ，而经过去嵌入处理后，测量误差可降低至 $\pm 2\%$ 以内，为后续的驻波优化工作提供了可靠的数据基础。

### 3.2 去嵌入技术对驻波特性分析的影响

准确的驻波特性分析是制定有效优化策略的关键前提，而去嵌入技术在这一过程中发挥着至关重要的作用。在未去除测试系统干扰的情况下，所观测到的驻波特性可能存在偏差，无法真实反映被测对象的实际情况。去嵌入技术通过去除测试系统引入的反射和损耗等干扰因素，使研究人员能够获取纯净的驻波数据，进而深入分析驻波的真实特性。例如，对于复杂的射频电路，去嵌入技术可以帮助准确确定驻波的频率响应特性，清晰展现出在不同频率下驻波的变化情况。同时，能够精准定位驻波的波腹和波节位置，以及准确计算驻波比的实际值。基于这些准确的特性分析结果，工程师可以更深入地理解驻波产生的原因，为制定针对性的优化策略提供有力依据，避免因错误的特性分析而导致无效或错误的优化措施。

### 3.3 去嵌入技术在驻波优化策略制定中的应用

去嵌入技术为驻波优化策略的制定提供了关键支持，贯穿于整个优化过程。在获取高精度的驻波测量数据和准确的驻波特性分析结果后，去嵌入技术能够帮助工程师制定更加科学合理的优化策略。例如，通过去嵌入技术精确确定了传输线与负载之间的阻抗失配情况，工程师可以根据这些信息，精准选择合适的匹配元件，并计算出其最优参数<sup>[3]</sup>。利用去嵌入技术对不同优化策略的实施效果进行实时监测和评估，也是其重要应用之一。在调整传输线长度或特性阻抗等优化措施实施后，借助去嵌入技术重新测量驻波特性，对比优化前后的数据，能够快速判断优化策略是否有效。若效果不佳，可根据去嵌入测量结果及时调整优化策略，实现对驻波的高效优化，确保电子系统的稳定运行和性能提升。

## 4 去嵌入技术在驻波优化中的具体方法与实施步骤

### 4.1 去嵌入算法的选择与应用

在驻波优化中，去嵌入算法的选择至关重要，需依据测试场景与精度要求而定。短路-开路-负载-直通（SOLT）算法操作相对简易，它通过测量短路、开路、负载以及直通标准件的响应，构建测试系统的误差模型，进而对测量数据进行去嵌入处理。此算法适用于一般性测试场景，对测试设备要求不高，成本较低。例如在普通射频电路的初步测试中，SOLT算法能够快速消除部分测试系统引入的误差，获取相对准确的驻波测量结果。而直通-反射-线（TRL）算法则以高精度著称，其通过对直通、反射以及传输线标准件的精确测量，可更为精准地校准测试系统。TRL算法在处理复杂测试环境，如多端口网络或高精度芯片测试时优势明显，能有效降

低测量误差,为驻波优化提供可靠数据基础。另外,全二端口去嵌入算法基于二端口网络理论,可处理多个非理想因素同时存在的复杂情况,在微波组件测试等领域应用广泛。工程师需根据实际测试需求,综合考量算法的精度、计算复杂度以及适用范围,合理选择去嵌入算法,确保其在驻波优化中发挥最大效能。

#### 4.2 测试系统的校准与去嵌入模型建立

测试系统的校准是去嵌入技术实施的关键前置步骤。首先,需选用标准件对测试系统进行测量,标准件的特性应精确已知且稳定可靠。例如,在射频测试中,常用短路、开路、负载以及特性阻抗标准件。通过矢量网络分析仪测量这些标准件在测试系统中的响应,获取包含测试系统自身误差的测量数据。随后,基于这些测量数据,运用选定的去嵌入算法,构建测试系统的误差模型。以SOLT算法为例,根据测量短路、开路、负载、直通标准件得到的散射参数,通过特定的数学运算,计算出测试系统的传输线损耗、反射系数等误差参数,从而建立起测试系统的误差模型。去嵌入模型的建立则是在误差模型基础上,结合被测对象的特性与测量原理,构建能够从原始测量数据中分离出测试系统误差的数学模型。该模型需准确反映测试系统与被测对象之间的关系,确保去嵌入过程的准确性与可靠性。建立完成后,还需对去嵌入模型进行验证,可通过测量已知特性的验证件,对比去嵌入模型处理后的数据与验证件真实特性,评估模型的准确性,必要时对模型进行修正与优化。

#### 4.3 去嵌入技术在驻波优化中的实施流程

去嵌入技术在驻波优化中的实施包含一系列有序步骤。以某5G基站射频前端模块的驻波优化项目为例,首先是测试数据采集环节。工程师运用高精度矢量网络分析仪,对包含测试系统影响的5G基站射频前端模块进行测量,获取原始驻波测量数据。由于测试系统中的连接线缆、测试夹具等存在寄生参数,原始数据显示驻波比波动较大,难以准确评估模块的真实驻波特性;接着进入去嵌入算法运算环节。鉴于该射频前端模块的复杂性以及对测量精度的高要求,工程师选用了直通-反射-线(TRL)算法。利用矢量网络分析仪测量短路、开路、负

载以及传输线标准件,获取校准数据,构建精确的测试系统误差模型。依据此模型以及去嵌入模型,对采集到的原始数据进行处理,去除测试系统引入的反射、损耗等干扰因素。经过处理后,得到了更为准确的反映射频前端模块真实驻波特性的数据;基于去嵌入后的数据,工程师深入研究驻波的频率响应,发现该模块在特定频段存在明显的驻波峰值,同时精准定位了驻波的波腹和波节位置,准确计算出驻波比的实际值。根据这些特性分析结果,在优化策略制定与实施阶段,工程师确定在特定位置添加匹配电感和电容,调整传输线的长度和宽度,以此改善阻抗匹配情况<sup>[4]</sup>。

实施完成后,再次利用去嵌入技术重新测量驻波特性。对比优化前后的数据,驻波比从最初的3.5降低至1.3,优化效果显著。该案例充分展示了去嵌入技术在驻波优化中的完整实施流程,从数据采集到最终优化效果评估,各个环节紧密相扣,有力地证明了去嵌入技术在实际工程中对驻波优化的有效性和重要性。若在其他类似项目中优化效果未达预期,同样可根据新的去嵌入测量结果,调整优化策略,重复上述步骤,直至实现满意的驻波优化效果,确保电子系统达到最佳性能状态。

#### 结束语

本文通过详细阐述去嵌入技术的基础理论、驻波优化原理与方法,以及去嵌入技术在驻波优化中的作用机制和具体实施步骤,全面展示了去嵌入技术在驻波优化领域的重要性和应用价值。相信随着技术的不断进步和发展,去嵌入技术将在更多领域得到广泛应用,为电子系统的性能提升和稳定运行做出更大贡献。

#### 参考文献

- [1]田宇,赵昶宇.软件建模技术在嵌入式软件中的研究与应用[J].科技与创新,2021(05):165-166+169.
- [2]李纯.嵌入式技术在电子通信系统节能中的应用[J].电子技术,2021,50(03):162-163.
- [3]胡涛.嵌入式技术在电子通信节能中的应用研究[J].电子制作,2020(18):78-79.
- [4]王明.嵌入式系统实时性优化技术研究[J].计算机应用,2020,40(4):112-118