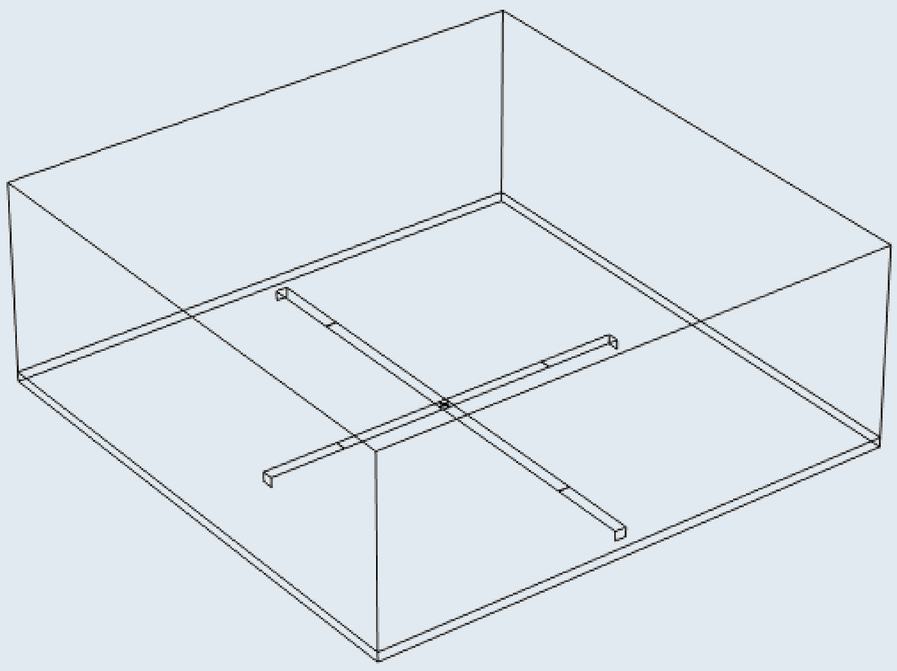


基于约瑟夫森环形调制器的 JPC 参量放大器件三维电磁建模与本征模、反射谱仿真

本研究面向超导量子信息处理中微弱微波信号的低噪声参量放大需求，构建“高阻硅衬底—正交微带谐振器—JRM集总电感—馈线端口”的三维电磁模型，系统研究正交双模的空间场分布与端口微波反射特性，定量提取谐振频率与品质因数。

李欣珂[1]

1. 北京大学物理学院，北京，中国

摘要

针对平面约瑟夫森参量转换器（JPC），在 COMSOL Multiphysics 射频模块中构建了三维全波电磁模型。仿真将约瑟夫森环形调制器（JRM）的 4 个约瑟夫森结等效为集总电感，并采用“特征频率分析 + 频域扫描”的计算方法开展研究。特征频率分析直接给出了系统的本征模态与空间场分布，成功辨识出相互正交的信号差模与闲频差模，并计算出两者的本征频率和品质因数。频域扫描进一步求解了端口微波反射谱（S11 与 S33），获得了两模式的谐振频率、带宽以及反射相位响应。特征频率与频域反射谷底高度吻合，验证了正交模式在空间与频域上的良好隔离，能够较好评估 JPC 的模式特性。

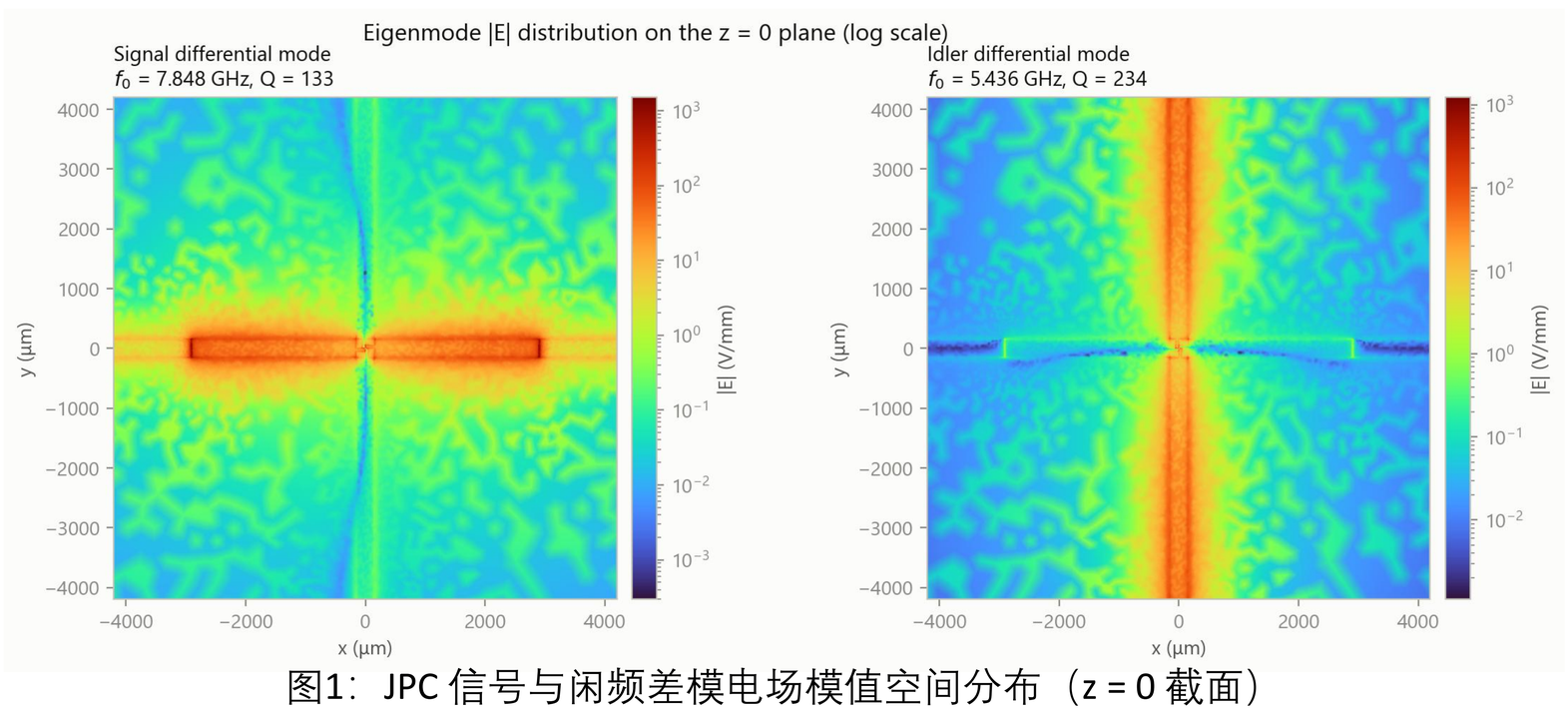


图1：JPC 信号与闲频差模电场模值空间分布（z = 0 截面）

方法

本文采用COMSOL Multiphysics RF模块建立平面JPC的三维全波电磁模型：在边长14mm的硅衬底上布置十字形微带线，中心为4个约瑟夫森结（使用集总电感等效）组成的环形调制器，4 条外围 50 Ω 馈线端部施加均匀集总端口，空气盒外边界施加散射边界条件。先在目标频段内一次性解出本征频率与空间本征场，频域扫描再以 0.5 MHz 步长对两个谐振峰展开精细扫描，提取 S 参数幅度与相位响应。几何网格划分中，对微米级 JRM 缝隙与端部电容耦合狭缝实施局部边界细化，衬底与外部真空域采用渐变自由四面体网格，在保证网格收敛与边界层精度的前提下有效控制系统自由度。

结果

仿真成功提取出正交解耦的两个模式的特性。特征频率分析显示，信号差模为 7.848 GHz（Q = 133），闲频差模为 5.436 GHz（Q = 234），两模式电场分别高度局域在水平与垂直微带臂中，展现出优良的空间正交隔离。频域反射谱显示，信号端口 S11 与闲频端口 S33 分别在 7.8516 GHz 与 5.4325 GHz 处呈现显著谐振凹陷，-3 dB 耦合带宽分别为 5.00 MHz 与 3.50 MHz。特征频率与频域扫描结果高度吻合，验证了器件良好的端口匹配与模式隔离特性。在获得了JPC的模式特性后，后续就可以进一步在模式附近进行非线性混频的研究。

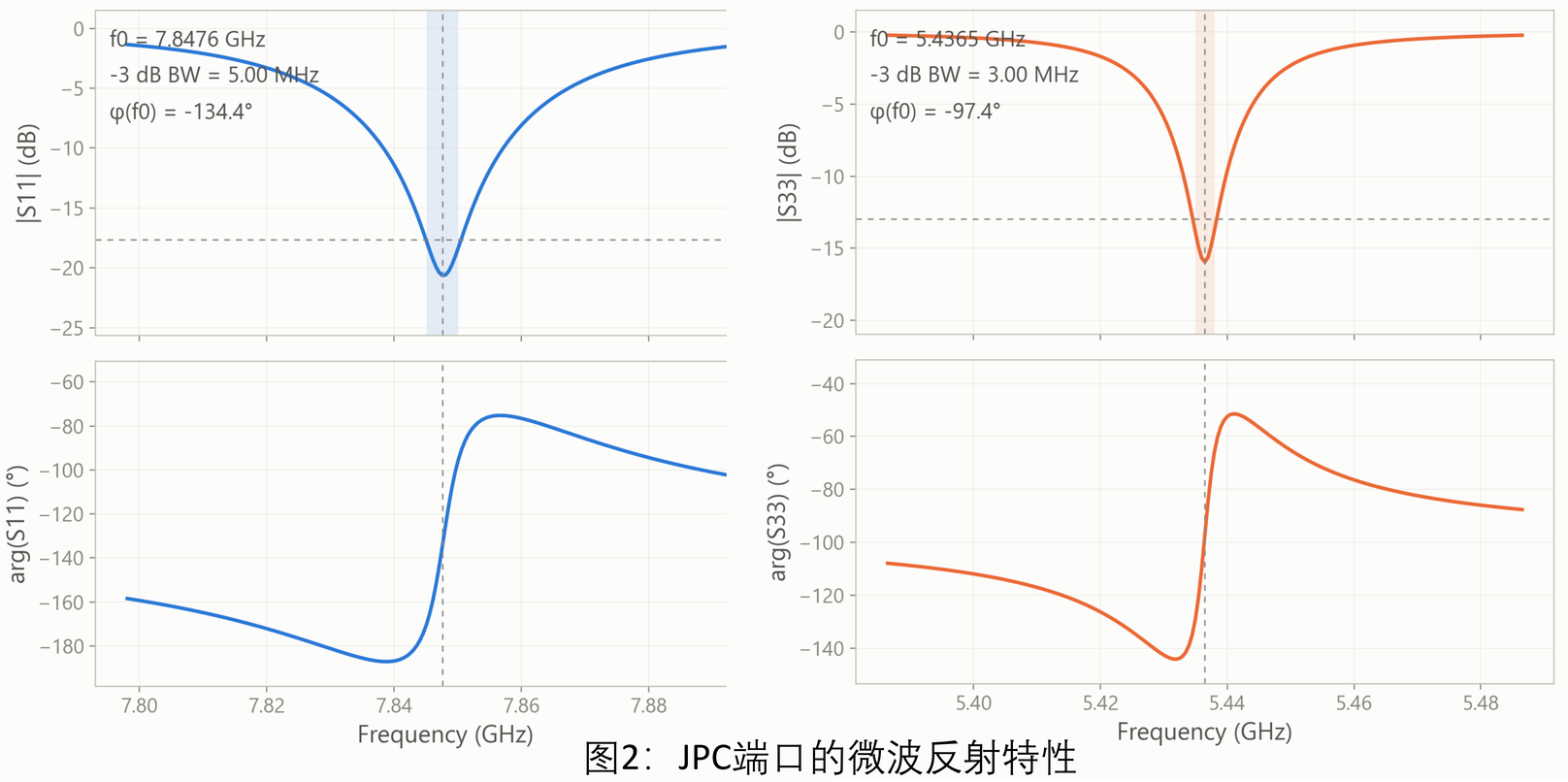


图2：JPC端口的微波反射特性

参考文献

[1] Schackert F. D. O., A Practical Quantum-Limited Parametric Amplifier Based on the Josephson Ring Modulator, PhD Thesis, Yale University (2013).

[2] Bergeal N. et. al., Phase-preserving amplification near the quantum limit with a Josephson ring modulator, Nature, 465, 64-68 (2010).

[3] Abdo B. et. al., Nondegenerate three-wave mixing with the Josephson ring modulator, Physical Review B, 87, 014508 (2013).