光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250521002

基于矩形波导的太赫兹腔体滤波器设计

王 荷[1]，李勇滔[1*]，李含雁[2]，马晓光[1]

（广西科技大学 1. 机械与汽车工程学院；2. 自动化学院，广西 柳州 545616）

摘 要： 在太赫兹频段通信系统中，高性能滤波器是实现信号选择性传输和抑制带外干扰的核心器件。然而，传统腔体滤波器设计方法只在低频段较为成熟，当工作频率提升至太赫兹频段时，则面临着高次模耦合效应显著、加工公差影响加剧以及插入损耗急剧增加等技术瓶颈，这些问题严重限制太赫兹通信系统的整体性能。文章基于CST Microwave Studio全波仿真平台，通过建立耦合理论模型，系统分析了腔体滤波器相关理论，设计出一种用于真空太赫兹系统的340 GHz腔体滤波器。仿真实验结果表明，所设计的滤波器在中心频率为340 GHz，频率范围为335～345 GHz，通带插入损耗控制在1 dB以内，通带内的回波损耗优于20 dB。在355 GHz处带外抑制达到－25 dB，在320～325 GHz处达到－35 dB。该研究为太赫兹频段高性能滤波器的设计与实现提供了重要的理论指导和技术参考，对推进太赫兹通信系统的发展具有一定的工程应用价值。

关键词： 太赫兹；腔体滤波器；直接耦合；CST仿真

中图分类号： TN713 **文章编号：** 1001－5868(2025)04－0652－07

Design of Terahertz Cavity Filter Based on Rectangular Waveguide

WANG He[1], LI Yongtao[1], LI Hanyan[2], MA Xiaoguang[1]

（1. School of Mechanical and Automotive Engineering；2. School of Automation，Guangxi University of Science and Technology，Liuzhou 545616，CHN）

Abstract： In terahertz frequency band communication systems，high-performance filters are essential for enabling selective signal transmission and suppressing out-of-band interference. While traditional cavity filter design methods are well-established for low-frequency bands，they encounter significant challenges when extended to the terahertz range. At higher frequencies，issues such as strong high-order mode coupling effects，increased sensitivity to manufacturing tolerances，and sharply rising insertion losses present technical bottlenecks that severely limit overall system performance. This study utilizes the CST Microwave Studio full-wave simulation platform. By developing a coupled theoretical model，the underlying principles of cavity filter design were systematically analyzed，and a 340 GHz cavity filter for vacuum terahertz systems was designed. Simulation results indicate that the designed filter，centered at 340 GHz，achieves a passband from 335 to 345 GHz，with insertion loss maintained below 1 dB and return loss within the passband exceeding 20 dB. Out-of-band suppression reaches －25 dB at 355 GHz and －35 dB in the 320 to 325 GHz range. This research offers important theoretical insights and technical references for the design and realization of high-performance terahertz filters. It also holds engineering significance for advancing the development of terahertz communication systems.

Key words： terahertz；cavity filter；direct coupling；CST simulation

收稿日期：2025－05－21.

基金项目：国家自然科学基金项目(62041402)；广西科技大学博士基金项目(24Z38).

* **通信作者：**李勇滔

0　引言

太赫兹频段（0.1～10 THz）作为电磁频谱中连接毫米波与光波的桥梁，在6G通信、高分辨率成像、分子光谱检测等领域展现出巨大潜力[1]。然而太赫兹信号的传播损耗高、器件加工难度大，尤其对核心无源器件（如滤波器）的性能提出了严苛要求，包括需兼具低插入损耗、高频率选择性以及紧凑化的结构，以适应高频系统的集成需求。

2020年余彩云等[2]通过理论分析与全波电磁仿真验证，设计出一种工作于中心频率280 GHz，实现15 GHz绝对带宽（相对带宽约5.36%），并且通带内插入损耗低至0.15 dB以下的滤波器。2021年熊阳等[3]基于8阶波导腔与数控铣工艺，实现中心频率179.1 GHz、插入损耗0.34 dB、带外抑制大于40 dB的高性能滤波器。2024年冯伟等[4]设计了两个工作频段分别为100.67～101.36 GHz和102.67～102.78 GHz的腔体滤波器。同年，黄永超等[5]设计出两款工作于212～218 GHz、插入损耗均小于1.5 dB具有准椭圆响应带通滤波器。

针对当前太赫兹滤波器工作频段多集中于300 GHz以下的现状，本文提出并设计了一款中心频率为340 GHz的四阶直接耦合腔体滤波器。基于CST Microwave Studio仿真平台对滤波器结构进行建模与参数优化，最终实现以下性能指标：（1）工作频段覆盖335～345 GHz，相对带宽达2.94%；（2）通带内回波损耗优于20 dB，插入损耗优于1 dB；（3）带外抑制特性显著，在320～325 GHz频段抑制深度达－35 dB，在355 GHz处实现－25 dB抑制水平。

1　矩形波导滤波器相关理论

1.1　矩形波导的结构与模式分析

矩形波导是一个空心的金属管，其横截面为矩形。通常用字母a表示矩形波导的宽边尺寸，b表示窄边尺寸。矩形波导的横截面尺寸如图1所示。

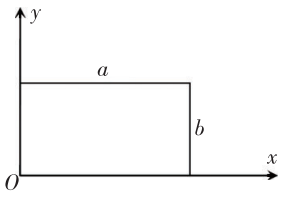


图1　矩形波导的横截面示意图

矩形波导中存在两种基本的模式，即横电波（TE波）和横磁波（TM波）。由于波导是单导体结构，而TEM波要求存在独立的导体对（如双导线或同轴线）。在波导内，电磁场必须通过横向电场和磁场的相互耦合形成驻波，纵向分量的存在是必要条件。因此，矩形波导不支持TEM模。TE波的电场和TM波的磁场在传播方向上均没有分量，只有横向分量。

对于给定的矩形波导尺寸a和b，不同模式具有不同的截止波长λ_c。当工作波长大于截止波长时，波导内无法形成有效的行波，电磁能量以衰减场形式存在，无法传播。只有当工作波长λ小于截止波长λ_c时，该模式才能在波导中传播。TE波和TM波的截止波长计算公式不同，以TE波为例，其TE_{mn}模式的截止波长可表示为：

$$\lambda_c=\frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2+\left(\frac{n}{b}\right)^2}} \tag{1}$$

式中，m和n分别为沿波导宽边和窄边的半波数。

不同模式的电场和磁场在矩形波导横截面上的分布是不同的。其中，TE_{10}模式因具有最低截止频率和简单的场分布，成为实际应用中优先选择的工作模式[6]。其电场在波导宽边方向上呈正弦分布，在窄边方向上为常数，磁场则在宽边和窄边方向上都有分布。此模式具有较低的传输损耗和较高的传输功率容量。

1.2　波导中的电磁波传输特性

波导作为高频电磁波传输的核心载体，其传输特性直接影响系统的带宽、损耗和功率容量。电磁波在矩形波导中的传播需满足截止条件，且其特性由模式参数、频率及波导几何尺寸共同决定[7]。波导的传输特性还可以从等效电路的角度进行分析，将波导等效为串联电感与并联电容构成的二端口网络，如图2所示。



图2　二端口网络等效图

S参数通过矩阵形式（如S_{11}，S_{21}，S_{22}，S_{12}等）量化信号在端口间的反射与传输行为，直接反映器件的匹配、损耗、隔离度等性能。

其中，S_{11}（散射参数）是二端口网络中描述信号从端口1反射回端口1的反射系数，及端口1的反射电压与输入电压之比，计算式为：

$$S_{11}=V_1^-/V_1^+ \tag{2}$$

当理想匹配时，$|S_{11}|\to-\infty$ dB（无反射）；当完全失配时，$|S_{11}|=0$ dB（全反射）

S_{21}（散射参数）是二端口网络中描述信号从端口1传输到端口2的传输系数，及端口2的输出电压与端口1的输入电压之比，公式表达为：

$$S_{21}=V_2^-/V_1^+ \tag{3}$$

在通带内，理想滤波器的$|S_{21}|\approx 0$ dB（无损耗）；在阻带内，$|S_{21}|\to-\infty$ dB（完全抑制）

截止频率f_c代表模式传播的最低频率阈值，可表示为：

$$f_c=\frac{c}{2\pi}\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \tag{4}$$

群速度v_g代表能量传播速度，决定信号延迟，可表示为：

$$v_g=c\sqrt{1-(f_c/f)^2} \tag{5}$$

式中，c为真空中的光速；m和n通常是与波导模式相关的整数，用于表征波导中电磁场的分布模式；f为电磁波实际工作频率。

1.3 矩形波导加工工艺

矩形波导作为高频电磁波传输的重要载体，其加工质量直接影响信号传输性能。

在结构方面，矩形波导通常由金属材料制成，具有简单的矩形截面，无复杂内部构造，制造工艺简便、成本低，且封闭性良好，既能抵御外界电磁干扰，又能防止内部电磁波外泄，保障信号传输的稳定与安全。

在传输性能方面，矩形波导内无内导体，欧姆损耗低，功率分布均匀，在高频、高功率及长距离传输中损耗较低；对高频信号传输效率高，能引导电磁波定向传播，减少能量损耗；支持TE模、TM模等多种传输模式，工作频段通常覆盖几十吉赫兹到几百吉赫兹，具备出色的宽频信号传输能力。

在加工方面，传统加工方法主要包括精密机械铣削与电火花加工。精密机械铣削通过数控机床控制刀具对金属材料进行切削，能够加工出尺寸较大的矩形波导，但当处理复杂三维结构时，受刀具尺寸和切削力限制，难以实现高精度的微小结构加工；电火花加工则利用电极与工件间的脉冲放电腐蚀材料，适用于硬度较高的材料加工，可实现一定精度的复杂形状加工，但存在加工速度慢、电极损耗大等问题。这些传统工艺在面对现代高频电磁系统对矩形波导微小化、高精度、低成本的需求时，有一定局限性。

UV LIGA技术[8]是一种基于紫外光刻的微加工工艺，通过紫外曝光显影光刻胶形成高深宽比模具，结合电铸工艺，最终获得高精度、复杂微结构。相较于传统LIGA技术，其成本更低且适用于中小规模生产。对于矩形腔波导滤波器，UV LIGA能精准控制腔体尺寸与表面粗糙度，实现高频信号的低损耗传输与优异滤波特性，同时支持紧凑化设计与批量制造。因此，采用UV LIGA技术加工矩形腔波导滤波器既能满足性能要求，又具备大规模生产的可行性。

2 340 GHz腔体滤波器设计

本文设计的滤波器采用矩形腔体结构，与传统微带滤波器[9]相比，具有插入损耗低、功率容量大、无辐射损耗、结构紧凑且易于批量加工等优势。基于上述特性，选择标准矩形波导WR-2.8（截面尺寸为0.711 mm×0.356 mm）实现带通滤波，其主模为TE_{10}模的单模工作频率范围为260～400 GHz，完全覆盖设计目标频段。滤波器指标要求：通带范围为335～345 GHz，通带内回波损耗优于20 dB，距中心频率（340 GHz）1.5倍带宽处带外抑制达－25 dB以上。

滤波器采用四阶直接耦合谐振腔拓扑结构，每个谐振腔工作于TE_{101}模式。谐振腔宽度与WR-2.8波导宽度保持一致（0.711 mm），高度与波导高度也保持一致（0.356 mm）以降低设计复杂度。首先通过CST Filter Designer 3D获取目标滤波器的耦合矩阵，再将参数导入CST来确定谐振腔间距与耦合窗口具体尺寸，最后进行全波电磁仿真优化。

3 滤波器仿真与分析

波导采用标准矩形波导WR-2.8为输入输出结构，截面尺寸0.711 mm×0.356 mm。整体为四个腔体，滤波器二维图如图3所示。

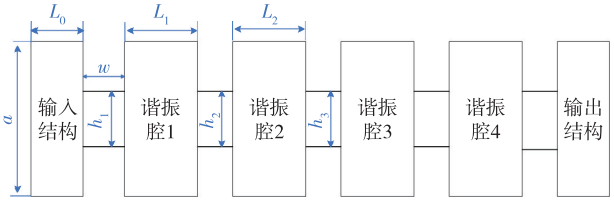


图3 四阶直接耦合滤波器二维图

在 CST Filter Designer 3D 输入设计指标，选取切比雪夫滤波器的阶数 $n=4$，得到目标 S 参数曲线如图 4 所示。

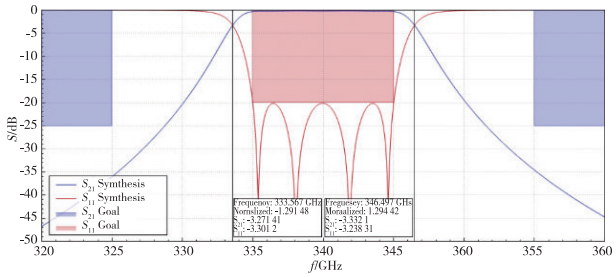


图 4　目标滤波器的 S 曲线

当提取目标滤波器所需数据时，核心参数为耦合矩阵 m 和外部 Q 值。耦合系数用于衡量谐振腔间的能量交互程度，数值的大小直接反映交互强度；外部 Q 值代表谐振系统与外部电路之间的能量交换效率。本文设计的滤波器耦合系数 $m_{1,2}$ 与 $m_{2,1}$ 的值均为 0.910 58，$m_{2,3}$ 与 $m_{3,2}$ 的值均为 0.699 925，同时外部 Q 值确定为 31.726 5。将 m 系数转化为 k 系数，可表示为：

$$k_{n(n-1)}=b_w\times m_{n(n-1)} \tag{6}$$

式中，n 表示第 n 个谐振腔；b_w 为单频段波导带通滤波器的通频带宽度，可表示为：

$$b_w=\frac{f_2-f_1}{\sqrt{f_1f_2}} \tag{7}$$

本设计采用对称结构，所以 $k_{1,2}=k_{2,1}=0.034\,6$，$k_{2,3}=k_{3,2}=0.026\,59$。

经本征模分析，获得初始尺寸，如表 1 所示。鉴于该结构采用对称设计，表中数据存在 3 个耦合窗高度变量与 3 个谐振腔长度变量。尽管输入输出结构在本质上亦属于波导范畴，但为便于阐述与分析，后续内容将统一以“输入输出结构”指代。

根据初始尺寸得到的 S 参数仿真结果如图 5 所示。

表 1　初始尺寸

参数	初始数值/mm	描述
a	0.711	矩形波导宽边
b	0.356	矩形波导窄边
w	0.150	耦合窗口长度
h_1	0.385	谐振腔 1 和输入结构耦合窗的高度
h_2	0.320	谐振腔 1～2 之间耦合窗的高度
h_3	0.310	谐振腔 2～3 之间耦合窗的高度
L_0	0.330	输入结构的长度
L_1	0.390	谐振腔 1 的长度
L_2	0.430	谐振腔 2 的长度

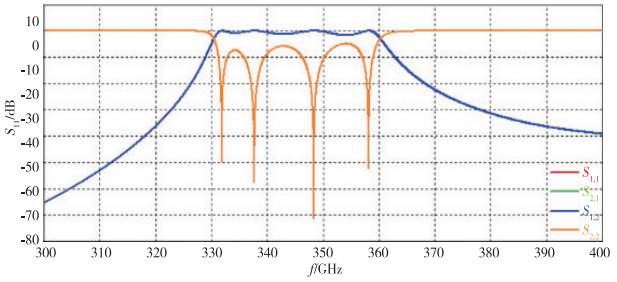


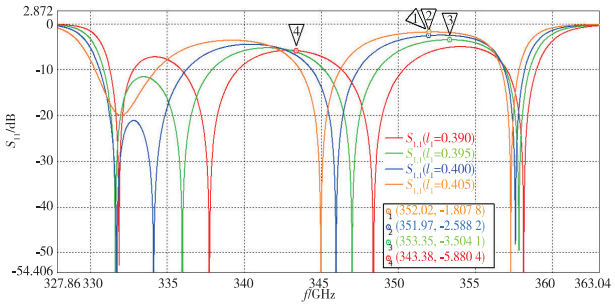
图 5　滤波器初始尺寸下的 S 参数仿真结果

由图可知，整体中心频率偏大，插入损耗和回波损耗均不满足设计要求，所以需要进一步优化。参数 a，b，w，L_0 属于滤波器的确定参数，需要进行优化的参数为 h_1，h_2，h_3，L_1，L_2。为了方便找出优化规律，需优化的参数均采取只改变其中一个参数，其余不变。如表 2 所示，步长均取 0.005 mm。

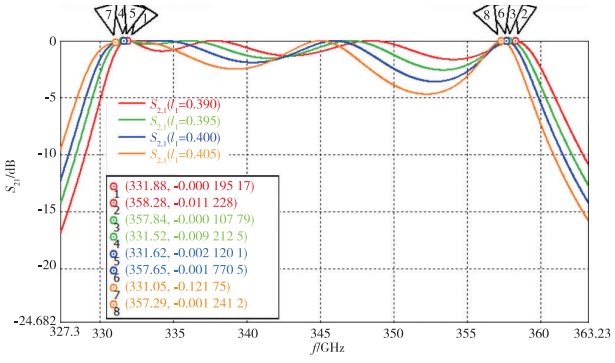
表 2　参数取值

参数	数值 1/mm	数值 2/mm	数值 3/mm	数值 4/mm
L_1	0.390	0.395	0.400	0.405
L_2	0.465	0.475	0.485	0.495
h_1	0.385	0.390	0.395	0.400
h_2	0.320	0.325	0.330	0.335
h_3	0.310	0.315	0.320	0.325

基于控制变量法，针对不同参数变化所引发的 S_{11}，S_{21} 对比图，如图 6～10 所示。



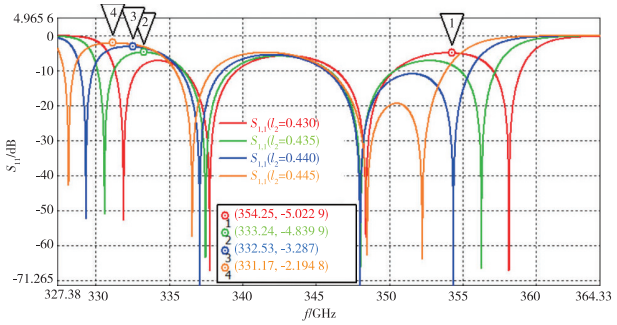
（a）S_{11} 对比图



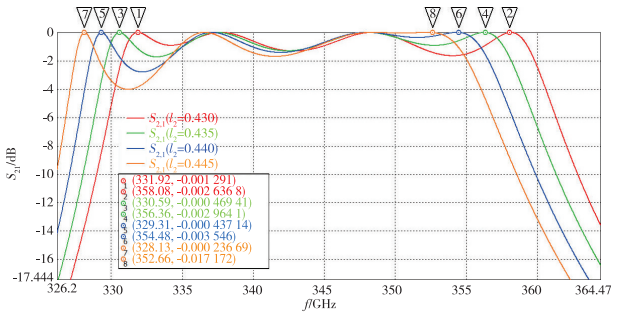
（b）S_{21} 对比图

图 6　滤波器在 L_1 取不同数值下的 S 参数图

通过图6可知，参数L_1与中心频率呈负相关，当L_1从0.39 mm增至0.405 mm时，中心频率由345.08 GHz下降至344.17 GHz；其对相对带宽的影响呈非单调趋势，在四个数值中，当L_1=0.395 mm时带宽达最大值7.63%，L_1=0.4 mm时略有降低。同时，随着L_1增加，插损变大，S_{11}从−5.88 dB恶化至−1.8 dB，且L_1的变化还会影响S_{21}的平坦度。对于S_{21}的平坦度特性，当L_1=0.4 mm时能实现第一波谷的最优平坦度，而第二、第三波谷的平坦度则随着L_1值的减小呈现逐步改善趋势。



（a）S_{11}对比图

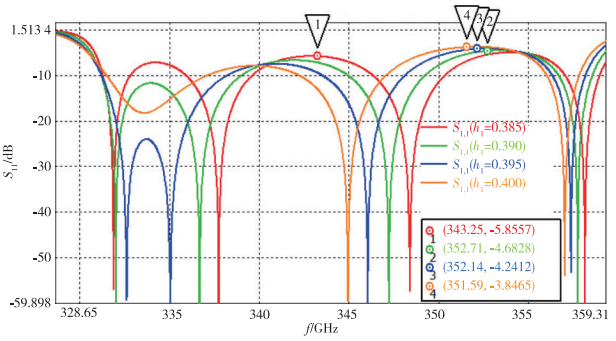


（b）S_{21}对比图

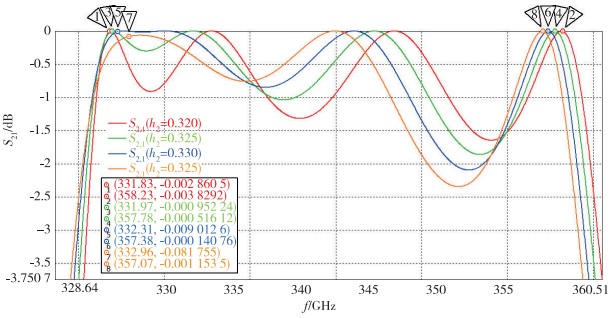
图7　滤波器在L_2取不同数值下的S参数图

通过图7可知，当参数L_2从0.43 mm增至0.445 mm时，中心频率由345 GHz逐渐下降至340.39 GHz，表明L_2与中心频率呈负相关，L_2增大时中心频率向低频偏移；相对带宽从7.58%逐步减小至7.2%，呈单调递减趋势；插入损耗随L_2增加而增大，S_{11}从−5.02 dB恶化至−2.2 dB。此外，L_2的变化对S_{21}的平坦度也产生影响，L_2值越小，第一波谷的平坦性越好，第二波谷的平坦性受L_2变化影响较小，但第三波谷的平坦性会随L_2减小而劣化。

通过图8分析可知，参数h_1对滤波器性能存在显著影响，h_1与中心频率呈非单调性。当h_1从0.385 mm增至0.4 mm时，中心频率由345.03 GHz逐渐下降至345 GHz，整体呈减小趋势，仅末值轻微



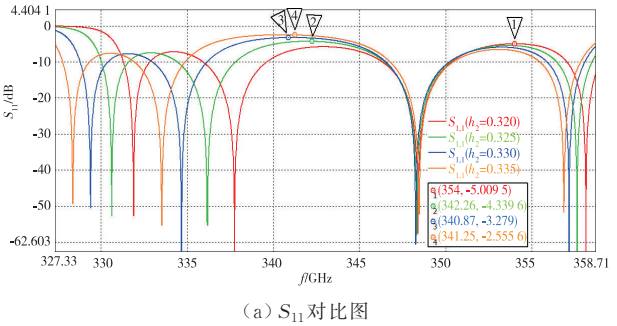
（a）S_{11}对比图



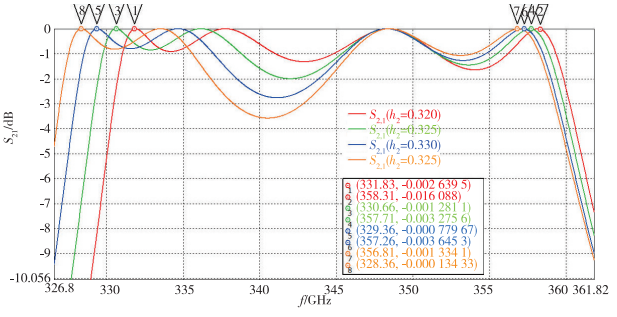
（b）S_{21}对比图

图8　滤波器在h_1取不同数值下的S参数图

回升；相对带宽从7.65%单调递减至6.8%，随h_1增大而持续收窄；插入损耗随h_1增加而逐渐变大，同时S_{11}从−5.85 dB恶化至−3.84 dB，端口匹配变差。对于S_{21}平坦度，第三波谷的位置会随h_1值减小而越低且向高频轻微偏移，而前两个波谷的平坦性则与h_1值正相关（h_1越大平坦性越好）。



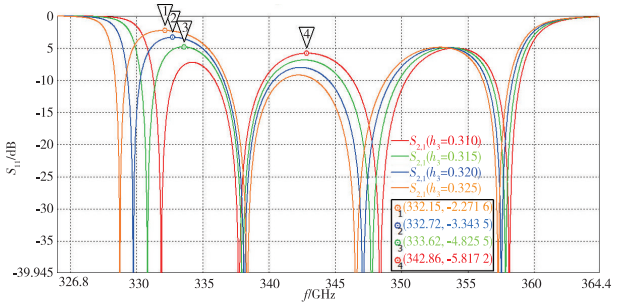
（a）S_{11}对比图



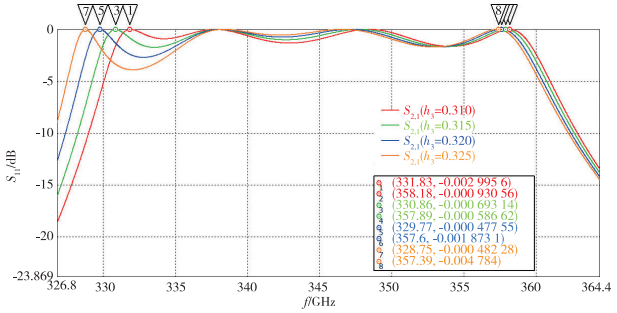
（b）S_{21}对比图

图9　滤波器在h_2取数值下的S参数图

通过图 9 分析可知，当参数 h_2 从 0.32 mm 增至 0.335 mm 时，中心频率由 345.07 GHz 逐渐下降至 342.58 GHz，与 h_2 呈负相关；相对带宽从 7.67% 单调递增至 8.3%，随 h_2 增大而拓宽；插损随 h_2 增加而整体变大，S_{11} 从 −5 dB 恶化至 −2.5 dB，端口匹配程度变差。对于 S_{21} 平坦度，h_2 的作用同样分异明显：第二波谷的平坦性受 h_2 调控最为显著，h_2 值越小波谷平坦性越好，而 h_2 值越大时波谷深度增加；第一波谷仅随 h_2 减小向高频平移，第三波谷的深度则随 h_2 减小而降低。



（a）S_{11} 对比图



（b）S_{21} 对比图

图 10　滤波器在 h_3 取不同数值下的 S 参数图

通过图 10 可知，当参数 h_3 从 0.31 mm 增至 0.325 mm 时，中心频率由 345.07 GHz 逐步降至 343.07 GHz，呈单调递减趋势，表明 h_3 与中心频率呈负相关；相对带宽从 7.63% 持续增加至 8.3%，随 h_3 增大而拓宽；插入损耗随 h_3 增加而整体上升，同时 S_{11} 从 −5.8 dB 恶化至 −2.2 dB，端口匹 h_3 增大而变差。对于 S_{21} 平坦度，第一波谷的平坦性随 h_3 减小显著提升，第二波谷深度随 h_3 减小而加深，第三波谷虽波形特征基本不变，但其位置会随 h_3 减小产生轻微高频偏移。

通过对滤波器 S 参数的仿真数据分析可知，L_1，L_2，h_1，h_2，h_3 变化均会影响中心频率。其中，L_2，h_2，h_3 对频率影响数随着增加而减小，L_2 影响显著，而 h_2，h_3 参数作用较弱，其值越小仅导致频率略微上升。L_1 对滤波器整体插入损耗影响较大，随着 L_1 增大，S_{11} 恶化到 1.8 dB。对于 S_{21} 平坦度，第一波谷在 L_1 =0.4 mm 时最平坦，h_3 减小可优化其平坦性；第二波谷平坦度随 L_1，h_2 减小而改善，L_2 影响不大，但 h_3 减小会加深波谷深度；第三波谷平坦性在 L_1，h_1 减小时改善，而 L_2，h_2 减小会劣化，同时 h_3 减小引发高频偏移。参数间存在复杂耦合，例如 h_2 增大虽然可改善第三波谷平坦性却增强第二波谷深度，需在多目标间权衡以实现整体性能优化。

经过多次迭代，最终参数如表 3 所示

表 3　优化后的参数

参数	优化数值/mm
a	0.711 0
b	0.356 0
w	0.150 0
h_1	0.389 5
h_2	0.283 5
h_3	0.266 6
L_0	0.330 0
L_1	0.413 6
L_2	0.479 5

最终优化后的 S 参数如图 11 所示。

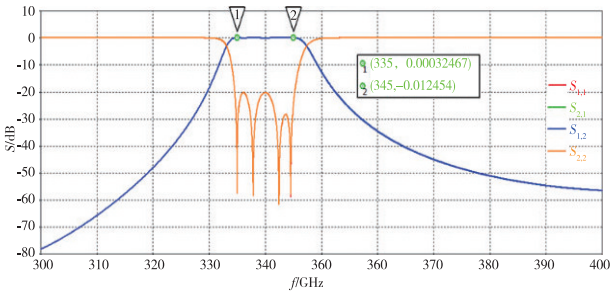


图 11　优化后的 S 参数

图 12 展示了优化后滤波器的 S 参数响应与设计目标的对比结果（实线：目标响应，虚线：优化响应），其中红色矩形框界定通带回波损耗指标（S_{11} < −20 dB），紫色矩形框标注带外抑制频率点（S_{21} < −25 dB）。

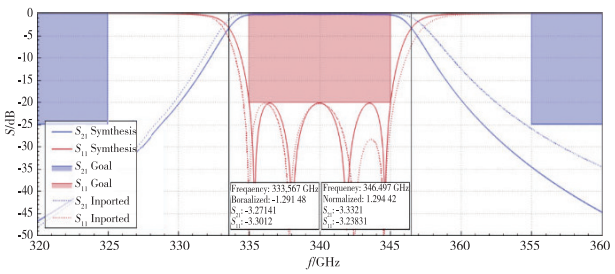


图 12　优化后的 S 参数与目标 S 参数对比图

性能评估如下：

带内性能：在335～345 GHz通带范围内，实测S_{11}最小值达－20 dB，S_{21}插损稳定于1 dB以内，完全满足设计要求。

带外抑制特性：优化后滤波器在355 GHz处实现S_{21}＝－25 dB，在320～325 GHz处带外抑制达到35 dB，完全满足设计要求。

4 结 论

本文基于标准矩形波导WR-2.8(0.711 mm×0.356 mm)设计了一款四阶直接耦合腔体滤波器，其设计指标为：通带范围335～345 GHz，通带内回波损耗优于20 dB，带外抑制在距中心频率(340 GHz)1.5倍带宽处达到－25 dB。通过参数化建模与全波电磁仿真优化，最终设计结果完全满足指标要求。研究揭示了关键参数的调控机制：谐振腔长度L_2对中心频率呈现强负相关性，耦合窗口高度参数h_1～h_3具有差异化调控特性，其中h_2，h_3影响呈亚线性衰减，而L_1对滤波器整体插入损耗影响较大。本研究为更高频太赫兹结构的设计优化提供了参考。

参考文献：

[1] 许宁生，余建军，迟 楠，等. 太赫兹通信和可见光通信技术发展状况与核心器件研究前沿[J]. 中国科学：信息科学，2025，55(4)：711-748.
Xu Ningsheng，Yu Jianjun，Chi Nan，et al. Terahertz and visible light communication：progress，frontiers，and challenges [J]. Scientia Sinica (Informationis)，2025，55(4)：711-748.

[2] 余彩云，李 宇. 280 GHz波导带通滤波器设计[J]. 微波学报，2020，36(S1)：306-308.
Yu Caiyun，Li Yu. Design of 280 GHz waveguide bandpass filter[J]. Journal of Microwaves，2020，36(S1)：306-308.

[3] 熊 阳，裴乃昌，何毅龙，等. 一种低插入损耗的180 GHz腔体滤波器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报，2021，19(2)：181-184.
Xiong Yang，Pei Naichang，He Yilong，et al. A low insertion loss 180 GHz cavity bandpass filter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology，2021，19(2)：181-184.

[4] 冯 伟，雷 程，秦瑞杰，等. 100 GHz双频带通腔体滤波器的设计及制作工艺研究[J]. 传感技术学报，2024，37(3)：416-422.
Feng Wei，Lei Cheng，Qin Ruijie，et al. Research on design and manufacturing process of 100 GHz dual-band pass cavity filter[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators，2024，37(3)：416-422.

[5] 黄永超，修 韬，王彩霞，等. 基于多模腔体的太赫兹准椭圆响应滤波器设计[J]. 空间电子技术，2024，21(4)：86-91.
Huang Yongchao，Xiu Tao，Wang Caixia，et al. A terahertz quasi-elliptical response filter based on multi-mode resonators [J]. Space Electronic Technology，2024，21(4)：86-91.

[6] 杜佳谕，成海峰，朱 翔，等. 基于合成技术的毫米波太赫兹固态功放研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报，2023，21(11)：1285-1294.
Du Jiayu，Cheng Haifeng，Zhu Xiang，et al. Review of millimeter-wave terahertz solid-state power amplifiers with combining technology [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology，2023，21(11)：1285-1294.

[7] 张沁旖，闫玉涛，丁江乔. 太赫兹频段波导滤波器的研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报，2021，19(5)：769-777，799.
Zhang Qinyi，Yan Yutao，Ding Jiangqiao. Review of terahertz waveguide filters research process [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology，2021，19(5)：769-777，799.

[8] 程 浩，曾永彬. 基于UV-LIGA的太赫兹波导微矩形腔体加工技术研究[J]. 电加工与模具，2021(S1)：60-65.
Cheng Hao，Zeng Yongbin. Research on processing technology of terahertz waveguide micro-rectangular cavity based on UV-LIGA [J]. Electromachining & Mould，2021(S1)：60-65.

[9] 肖功亚. 小型化微带结构平面滤波器的分析和设计[D]. 南京：东南大学，2018.
Xiao Gongya. Analysis and design of miniaturized planar microstrip filter[D]. Nanjing：Southeast University，2018.

作者简介：

王 荷(2000－)，女，在读硕士研究生，主要研究方向为太赫兹无源器件设计与加工；

李勇滔(1976－)，男，博士，研究生导师，主要研究方向为微电子专用设备及关键零部件、新原理科学仪器、新能源汽车芯片。