

## 低互调三频同轴腔体合路器的设计与实现

葛雪飞<sup>1</sup>, 张需溥<sup>2</sup>, 游彬<sup>1</sup>

(1. 杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310018; 2. 杭州紫光网络技术有限公司, 浙江 杭州 310051)

**摘要:** 设计了一种低无源互调的三频同轴腔体合路器。通过设计公共腔的抽头结构并对其相对腔体位置进行调谐, 优化设计谐振腔之间台阶的高度, 以降低互调失真, 从而减小三阶互调。在满足设计指标的基础上设计一款基于DCS1800、TD-SCDMA2100、WLAN2600的低互调三频合路器, 并进行了加工制作和实际测量。测量结果显示, 得到3个频带的三阶互调值分别小于-172.50 dBc、-169.75 dBc、-173.30 dBc, 满足要求, 并验证了设计的可行性。

**关键词:** 低互调; 合路器; 抽头; 台阶

中图分类号: TN73

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212364

中文引用格式: 葛雪飞, 张需溥, 游彬. 低互调三频同轴腔体合路器的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 108-112.

英文引用格式: Ge Xuefei, Zhang Xupu, You Bin. Design and realization of low intermodulation three-frequency coaxial cavity combiner[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 108-112.

## Design and realization of low intermodulation three-frequency coaxial cavity combiner

Ge Xuefei<sup>1</sup>, Zhang Xupu<sup>2</sup>, You Bin<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Hangzhou Ziguang Network Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

**Abstract:** A three-frequency coaxial cavity combiner with low passive intermodulation is designed. By designing the tap structure of the common cavity and tuning its relative cavity position and optimizing the height of the steps between the resonant cavities, the intermodulation distortion is reduced, thereby reducing the third-order intermodulation. On the basis of meeting the design specifications, a low-intermodulation triple-frequency combiner based on DCS1800, TD-SCDMA2100, and WLAN2600 was designed, processed and measured. The measurement results satisfy that the third-order intermodulation values of the three frequency bands are less than -172.50 dBc, -169.75 dBc, and -173.30 dBc, respectively, and verify the feasibility of the design.

**Key words:** low intermodulation; combiner; tap; step

## 0 引言

随着移动通信系统的不断发展, 对合路器的需求也越来越高。合路器在移动通信系统和基站得到了非常广泛的应用, 如大型写字楼、大型商场、地铁的覆盖<sup>[1]</sup>等, 由于其空间相对较小, 需要的合路器的性能要求也越来越高, 因此低损耗、高抑制、小体积、低互调的多频合路器成为合路器的发展和应用的主要方向。

合路器广泛应用的同时, 对其性能要求也不断增加。传统的合路器优缺点十分明显, 微带合路器虽其体积小、频段宽、加工简单, 但其功耗较大、所能承受的功率小、互调干扰大<sup>[2]</sup>; 波导结构的合路器其性能较好, 所能承受的功率较大, 但其体积大不易集成<sup>[3]</sup>; 介质合路器在各个方面均有较好的性能, 但因现在国内生产工艺与成本的局限, 在目前的通信系统中应用还不是特别的广泛。而同轴腔体合路器凭借其结构紧凑、性能优良、成本相对于介质结构较低、便于调谐的特点, 在通信系统中

有着广泛的应用<sup>[4]</sup>。

本文设计的合路器由两个交叉耦合设计的滤波器单元组成, 3个通道采用了公共腔的结构设计。设计一款基于DCS1800、TD-SCDMA2100、WLAN2600的三频合路器, 频段范围分别为1 710 MHz~1 880 MHz、1 920 MHz~2 170 MHz、2 500 MHz~2 690 MHz。对设计得到的合路器进行实际测试, 结果表明该合路器具有较低的三阶互调特性, 并且其他的性能也达到了设计指标。

## 1 电路结构与模型

根据所提出的结构, 本文设计的三频带合路器主要设计指标见表1。

为了减小通带内的衰减, 设计中采用切比雪夫滤波器的设计方法<sup>[5-6]</sup>, 如式(1)~式(7)所示:

$$K_{i,j}^k = B_n \cdot M_k(i, j) \quad (1)$$

$$Q_c^k = 1/B_n [M_k(n_{pk} + 1, n_{pk} + 2)]^2 \quad (2)$$

表1 合路器的参数指标

指标	DCS(1800)	TD-SCDMA(2100)	WLAN(2600)
频率范围/MHz	1 710~1 880	1 920~2 170	2 500~2 690
插入损耗/dB	≤0.35	≤0.35	≤0.35
带内波动/dB	≤0.5	≤0.5	≤0.5
隔离度/dB	45@2100	45@1800	55@1800
	55@2600	55@2600	45@2100
电压驻波比	≤1.3	≤1.3	≤1.3
特性阻抗/ $\Omega$	50		
三阶互调/dBc	-168@(43 dBm at BW)		

$$B_n = B/f_0 \quad (3)$$

$$f_{R,j}^k = f_0 \{ [1 + (B_n M_{i,j}^k / 2)]^{1/2} - B_n M_{i,j}^k / 2 \} \quad (4)$$

$$K_{i,j}^k = B \cdot [M_k(i, j) / (c_0)^{1/2}] \quad (5)$$

$$Q_e = c_0 / B_n \quad (6)$$

$$f_{R,0}^k = \{ [1 + (B_n b_0 / 2)^2]^{1/2} - B_n b_0 / 2 \} \quad (7)$$

式中,  $K_{i,j}^k$  为滤波器的内部耦合系数,  $M_k(i, j)$  为谐振腔器之间的耦合系数,  $Q_e$  为滤波器的  $Q$  值,  $f_{R,j}^k$  为谐振腔的谐振频率,  $B$  为滤波器带宽,  $B_n$  为相对带宽,  $M_{i,j}^k$  为耦合矩阵的元素,  $b_0$  为公共腔归一化导纳,  $c_0$  为归一化电容,  $f_0$  为中心频率,  $f_{R,0}^k$  为公共腔的谐振频率。

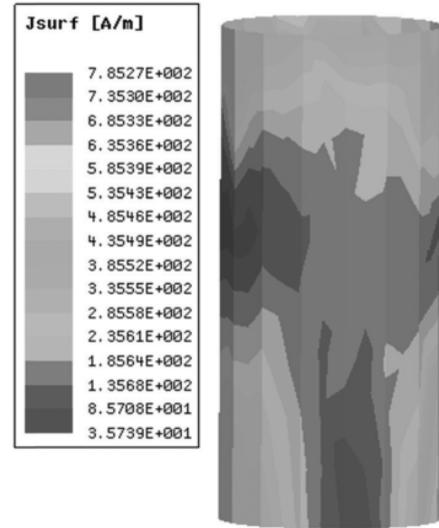
对于两个频率分别为  $f_1$  和  $f_2$  的信号, 经过具有非线性器件会产生  $(m, n)$  ( $m, n$  为正整数) 分量的谐波失真, 这种失真被称为互调失真。在互调失真中, 三阶互调失真最为明显, 即为  $PIM_3$ 。下面给出同轴腔体的无源互调公式<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} PIM &= \frac{cb^2}{4\sqrt{\varepsilon}} \cdot \ln \frac{b}{a} \cdot H_{IM}^2(b) \\ &= \left( \frac{69}{128\pi} \right)^{1/2} \frac{cw_2}{8\pi\sigma} \frac{\gamma^2}{c_p^2} \left( 1 + \frac{b^3}{a^3} \right) \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\left( \ln \frac{b}{a} \right)} \\ &\quad \cdot \left( \frac{5\omega_1 - \omega_2}{\omega_2 - \omega_1} \right)^2 H_1^4(b) H_2^2(b) z^3 \end{aligned} \quad (8)$$

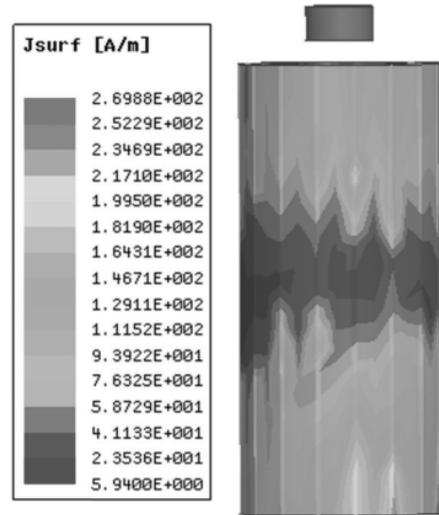
其中,  $a$ 、 $b$  为谐振腔的内外半径,  $\varepsilon$  为材料的介电常数,  $\sigma$  为材料的电导率,  $c$  为光速,  $H_1(b)$ 、 $H_2(b)$  分别为频率  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  在外半径处的磁场强度。

由式(8)可知, 互调失真可由腔体结构形式、材料特性、磁场强度确定。由于谐振腔底部的磁场强度较大, 对于互调的影响很大。可以通过增加谐振杆壁的厚度, 降低磁场密度, 因此在优化设计中可采用增加谐振杆壁的厚度来减小, 从而降低互调值。同时可知值与电流密度有关, 可减小电流密度, 进而降低互调值<sup>[8]</sup>。如图1、图2显示了调谐谐振杆的长度和腔间台阶的高度对于电流密度的影响。由图1可知, 增加谐振杆的长度, 电流密度也增加。由图2可知, 增加腔间台阶的高度, 电流密度也会增加。

因此本文在设计时, 一方面通过调谐杆的长度和腔



(a) 无谐振杆



(b) 谐振杆的高度为 2 mm

图1 调谐谐振杆对于电流密度的影响

间台阶的高度, 使其尽可能地小来降低互调失真; 另一方面抽头结构和相对于腔体的位置对于互调失真更为明显。因此可通过调谐抽头的结构和位置, 来改善合路器的互调失真。

所设计的合路器由3路组成, 其中两路的频带中加入了交叉耦合的结构, 产生传输零点, 从而改善带外抑制, 提高合路器的隔离度等指标, 其中, 在1 800 MHz频段加入了一个容性耦合结构, 在2 100 MHz频段加入了两个感性耦合结构。在合路的端口通过一个公共腔连接来提高合路器的回波损耗并减小合路器的体积。

根据式(1)~式(7)和耦合谐振器滤波器的理论设计, 通过耦合矩阵的综合以及归一化反归一化可以得到合路器每一个频带的阶数、耦合系数, 外部品质因数  $Q$  值以及谐振腔的谐振频率。合路器的3个通带的阶数分别为7、7、5。通过每一频带的谐振频率、耦合系数和外部  $Q$  值得到合路器的整体参数并在 designer 中建立合路器电路

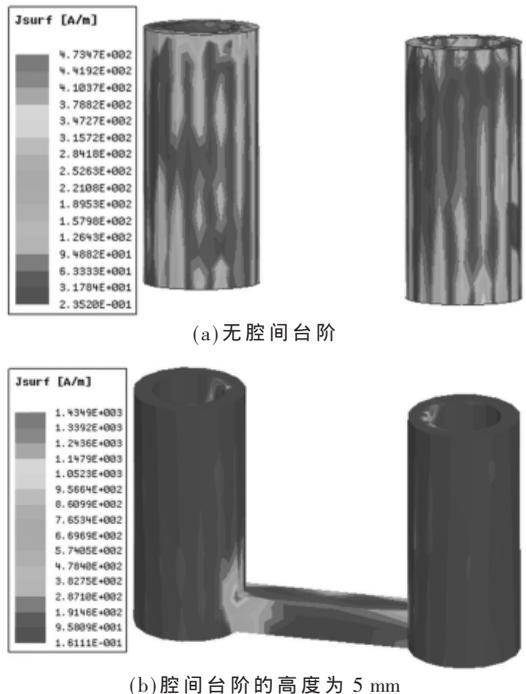


图2 调谐腔间台阶对于电流密度的影响

的整体模型,整体电路是由多个谐振腔组成的,合路器的拓扑结构如图3所示,其中圆形代表谐振腔,与公共腔相连的正方形代表合路端口,其余正方形代表个频带的端口。谐振腔之间相连的电路结构模型如图4所示。对其中的参数进行优化仿真,得到的S参数曲线如图5所示。

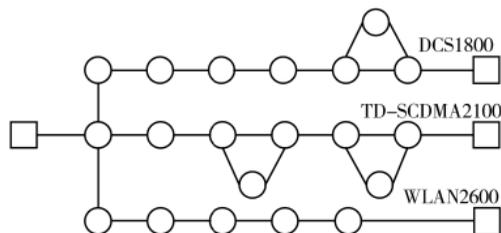


图3 合路器的拓扑结构

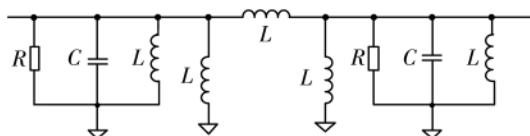


图4 谐振腔之间相连的电路结构模型

从图5中合路器仿真的S11、S21、S31、S41参数曲线可得,从S11得到合路器的回波损耗小于22dB,合路器的插入损耗和通带间隔离度也满足要求。

在合路器的方的设计中,抽头结构的设计采用的是电耦合式,根据所设计的频带带宽大小,采用群延时的方法确定抽头的位置,采用下式<sup>[9-10]</sup>:

$$\Gamma_d(\omega) = -\frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \quad (9)$$

其中,φ为S11的相位,ω为角频率。在实际的设计中,

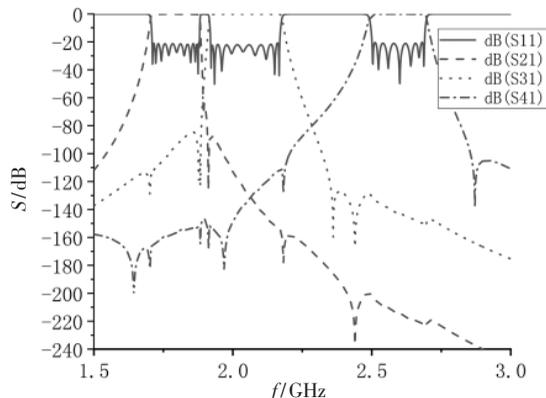


图5 合路器的电路模型S参数曲线

用式(10)计算:

$$\Gamma_d(\omega) = \frac{500}{\Delta f} \quad (10)$$

其中,Δf为所设计滤波器的频率带宽。

## 2 电磁仿真与实物测试

根据电磁仿真软件HFSS仿真优化谐振腔的结构,腔间台阶的高度和抽头位置,得到最终的合路器的结构尺寸,图6为抽头的结构。在用AutoCAD对合路器的整体模型进行排版设计,得到的CAD模型如图7所示。

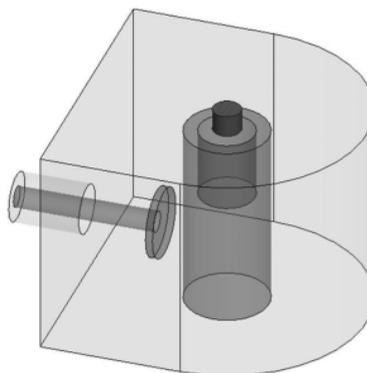


图6 抽头结构

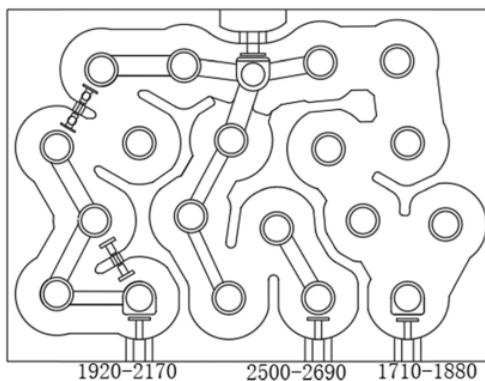


图7 合路器的腔体模型

根据AutoCAD得到的模型参数如图8所示,进行加工制作得到的合路器的实物图如图9所示,图10为合路器内腔图。

其中 1 800 MHz 频段内导体高度分别为 25.8 mm、25.8 mm、25.8 mm、25.8 mm、26.0 mm、25.5 mm、25.0 mm，2 100 MHz 频段内导体高度为 24.0 mm、22.5 mm、24.0 mm、22.5 mm、23.5 mm、24.5 mm、24.0 mm，2 600 MHz 频段内导体高度为 18.0 mm、16.8 mm、16.0 mm、16.0 mm、17.0 mm，公共腔的公共腔内导体高度为 24.5 mm，内导体的直径都为 10.0 mm，3 个频段腔体直径都为 25 mm。3 个频段的抽头都为高度为 17.0 mm，壁距分别为 2.5 mm、1.8 mm、1.9 mm。公

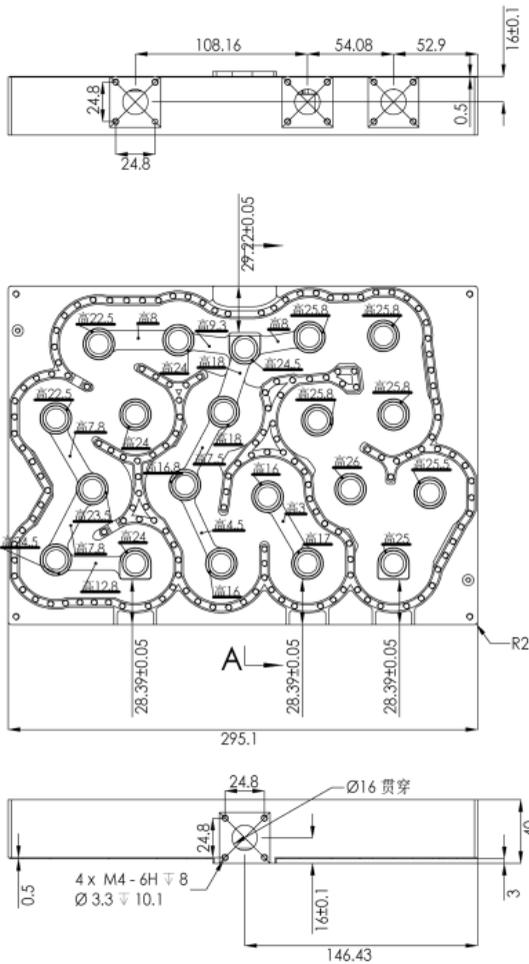


图 8 合路器的整体 CAD 数据图

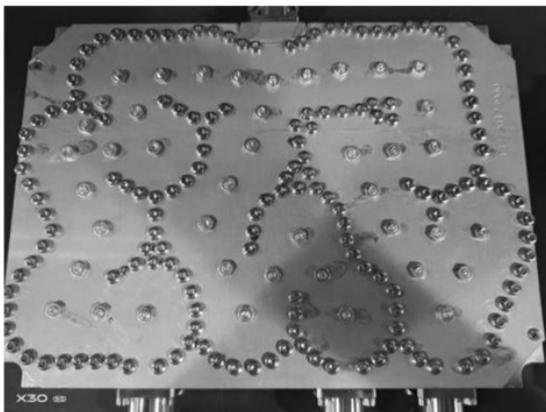


图 9 合路器的实物图

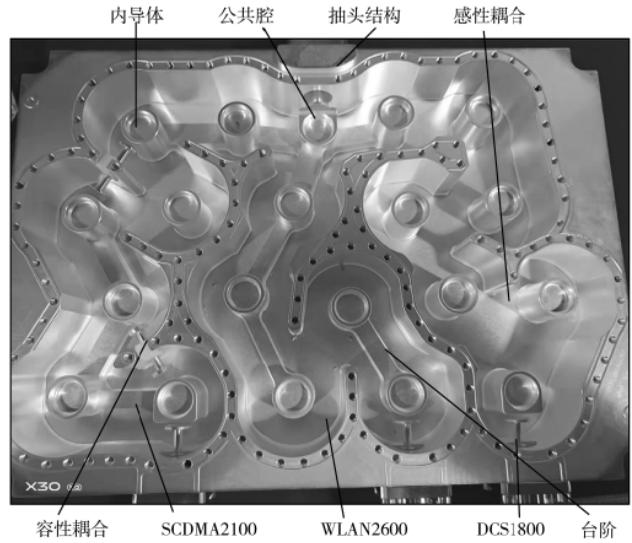


图 10 合路器的内腔图

共腔抽头高度为 24.0 mm，壁距为 2.0 mm。与公共腔相连的腔体和腔体与腔体之间采用台阶设计来增强耦合，与公共腔相连的腔体的台阶高度分别 8.0 mm、9.3 mm、18.0 mm，1 800 MHz 频段腔体与腔体之间无台阶，2 100 MHz 频段腔体与腔体之间台阶高度分别为 8.0 mm、0.0 mm、0.0 mm、7. mm、7.8 mm、12.8 mm，2 600 MHz 频段腔体与腔体之间台阶高度分别为 18.0 mm、7.5 mm、4.5 mm、0 mm、3.0 mm。

使用 AgilentE5071C 网络分析仪进行测试，测试时，室内常温约为 27 °C，需要对 3 路信号进行测试，测试一路信号时，另两路的输入端需接匹配负载，端口也需接上匹配负载。

合路器实测的 S 参数图如图 11 所示，从图 10 可以看出，插入损耗(S21)在 0.22 dB 以内，回波损耗到达 21 dB，隔离度达到 45 dB 以上，都达到了指标的要求。

在使用无源互调仪进行三阶互调值的测试，测试结果如图 12~图 14 所示，得到 3 个频段 TX、RX 端的三阶互调

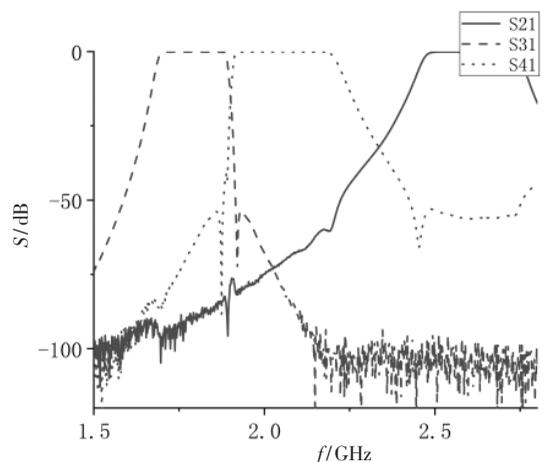


图 11 合路器的实测 S 参数曲线

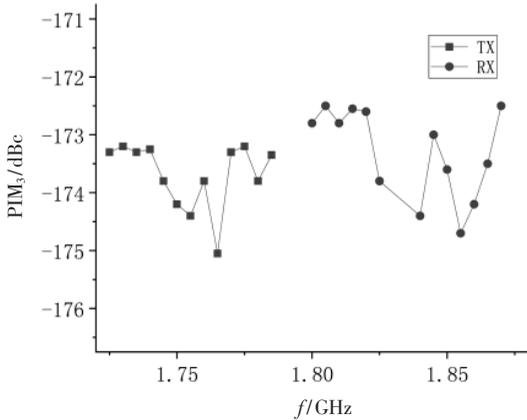


图 12 1 800 MHz 频段的三阶互调测试结果

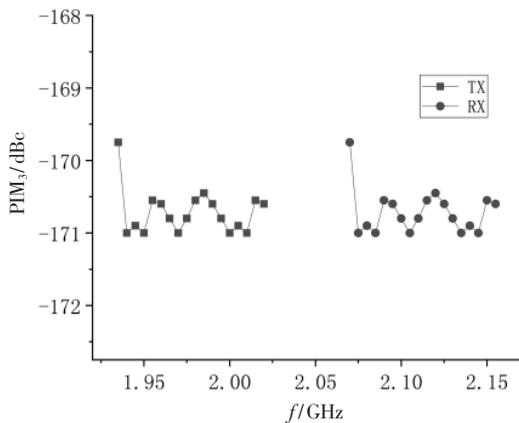


图 13 2 100 MHz 频段的三阶互调测试结果

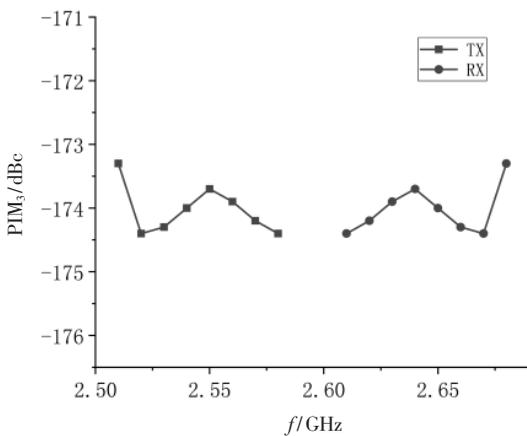


图 14 2 600 MHz 频段的三阶互调测试结果

值(PIM3)分别低于-172.50 dBc、-169.75 dBc、-173.30 dBc。

与其他文献相比,本文设计的合路器同频段的三阶互调值都有所降低,见表 2。

表 2 与其他文献的对比研究

文献	1 800 MHz 频段	2 100 MHz 频段	2 600 MHz 频段
文献[11]	-140 dBc	—	-140 dBc
文献[5]	-153.5 dBc	-161.2 dBc	—
本文	-172.50 dBc	-169.75 dBc	-173.30 dBc

### 3 结论

本文设计了一款具有低三阶互调的三频腔体合路器,通过在合路端口采用公共腔结构来减小每个频带的回波损耗,并减小合路器的体积。在1 800 MHz 和 2 100 MHz 频段加入交叉耦合设计,增加了传输零点,使得合路器具有较好的带外抑制,从而提高相临近的频带之间的隔离度。通过抽头结构和腔间台阶的设计,以达到低的三阶互调值。所设计的三频合路器的实际测量与仿真结果基本一致,证明了设计的可行性。在频带越来越拥挤的现代移动通信中,往往一个通信制式中需要多个信道才能满足要求,而这种合路器能够在多信道的前提下,满足通信系统对于小型化、低互调的性能要求,从而保持各个系统的通信质量,具有良好的发展前景。

### 参考文献

- [1] 方勇,彭斌.多系统合路时的地铁覆盖解决方案及切换分析[J].移动通信,2008,32(21):42-47.
- [2] SHITVOV A P,OLSSON T,BANNA B E,et al.Effects of geometrical discontinuities on distributed passive intermodulation in printed lines[J].IEEE Trans-MTT,2010,58(2):256-362.
- [3] 张玉林,洪伟,吴柯,等.一种新型基片集成波导腔体滤波器的设计与实现[J].微波学报,2005,21(B04):138-141.
- [4] 封建华.多频同轴腔体合路器的小型化设计[J].移动通信,2016,40(19):60-65.
- [5] 潘宁.腔体合路器的研究与设计[D].杭州:中国计量学院,2015.
- [6] 罗旭荣,王锡良,张晓峰.带有交叉耦合的平行四腔螺旋滤波器设计[J].电子元件与材料,2011,30(3):52-54.
- [7] WILCOX J Z,MOLMUD P.Thermal heating contribution to intermodulation fields in coaxial waveguides[J].IEEE Transactions on Communications,1976,24(2):238-243.
- [8] 张苏南,叶强,罗昌桅.带通带阻型同轴腔体合路器的设计[J].机械设计与制造,2013(5):180-182.
- [9] 刘晓锋,王锡良,杨颖.广义切比雪夫波导带阻滤波器设计[J].电子元件与材料,2011,30(12):50-53.
- [10] NESS J B.A unified approach to the design, measurement, and tuning of coupled-resonator filters[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,1998,46(4):343-350.
- [11] 张苏南.基于公共腔的多频合路器研究与设计[D].杭州:中国计量学院,2013.

(收稿日期:2021-11-22)

### 作者简介:

葛雪飞(1996-),通信作者,男,硕士研究生,主要研究方向:低互调无源器件,E-mail:1945968719@qq.com。

张需溥(1973-),男,博士,主要研究方向:天线与电磁波传播、射频电路技术、无源互调。

游彬(1974-),女,博士,教授,主要研究方向:微波器件。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所