

集成宽带折叠半模基片集成波导带通滤波器

翟国华^{1,2}, 洪伟², 吴柯², 韦婧²

(1. 华东师范大学信息科学技术学院, 上海 200241; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 本文提出并设计了一种新型的折叠半模基片集成波导(Folded Half-Mode Substrate Integrated Waveguide: FHMSIW)宽带带通滤波器,并给出了FHMSIW上层金属层槽缝式和中间金属层槽缝式宽带滤波器的仿真和测试结果.相对于半模基片集成波导(Half-Mode Substrate Integrated Waveguide: HMSIW)槽缝式滤波器,由双层PCB制作的FHMSIW槽缝式滤波器的尺寸减小了约一半.同时测试结果和仿真结果表明该宽带滤波器具有损耗小、带外抑制好等特性.

关键词: 折叠半模基片集成波导; 半模基片集成波导; 带通滤波器

中图分类号: TN454 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 04-0825-05

Compact Wideband Folded Half Mode Substrate Integrated Waveguide Bandpass Filters

ZHAI Guo-hua^{1,2}, HONG Wei², WU Ke², WEI Jing²

(1. School of Science and Technology of Information, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: This paper presents the design and experiment of the folded half mode substrate integrated waveguide (FHMSIW) slot bandpass filters. Top layer and middle layer slot super-wide-band FHMSIW filters are simulated and fabricated based on double layer standard printed circuit board (PCB) process. The size of the FHMSIW filter is reduced nearly by 50% compared with half-mode substrate integrated waveguide (HMSIW) filter. Performances of these super-wide bandpass filters with low insertion loss and sharp out-of-band characteristics are observed from both simulated and measured results.

Key words: folded half mode substrate integrated waveguide (FHMSIW); HMSIW; bandpass filters

1 引言

现代高速发展的微波毫米波通信系统对滤波器的损耗和带宽的要求越来越严格.特别是在宽带接收机中,宽带滤波器的应用更加广泛.传统上设计滤波器一般是利用金属波导或者微带线结构,然而上述结构成本比较高或者难以实现高的性能^[1~3].

为了综合微带线和矩形波导的优点,近年来,一种名为基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide: SIW)的新型导波结构被提出^[4,5],由于可以利用标准的PCB工艺进行加工制作,这种新结构与传统的金属矩形波导相比,具有结构紧凑、集成度高、加工容易以及生产成本低等优点.目前,已经有许多关于SIW滤波器的研究报告^[6~8].然而由于波导结构截止频率的限制,在较低的微波频段内,SIW的宽度偏大,因此在某些场合的应用中受到了限制.最近,半模基片集成波导(Half Model Substrate Integrated Waveguide: HMSIW)^[9,10]和基片集成折

叠波导(Substrate Integrated Folded Waveguide: SIFW)^[11]的概念被提出,这种结构与SIW结构相比,在保持了其原有特性的前提下尺寸缩减了近50%.HMSIW也已被应用于滤波器的研制^[12,13].

为了进一步减小面积,最近洪伟教授等在总结基片集成波导、半模基片集成波导、基片集成折叠波导结构及其主模电场分布的基础上提出了折叠半模基片集成波导(Folded Half Mode Substrate Integrated Waveguide: FHMSIW)结构^[14,15],图1所示为FHMSIW从SIW、SIFW和HMSIW演变的横截面结构及其主模电场分布图.从图1可以看到,基片集成折叠波导工作在主模状态时,上层介质中心对称面可等效为磁壁,电场以其为镜像对称分布于两侧,底层介质的中心为电壁,因此在结构上可以沿中线分割成对等的两个折叠半模导波结构,这就是折叠半模基片集成波导结构.折叠半模基片集成波导的横向尺寸只有半模基片集成波导和基片集成折叠波导的一半,进一步提高了基片集成波导器件的集成度,

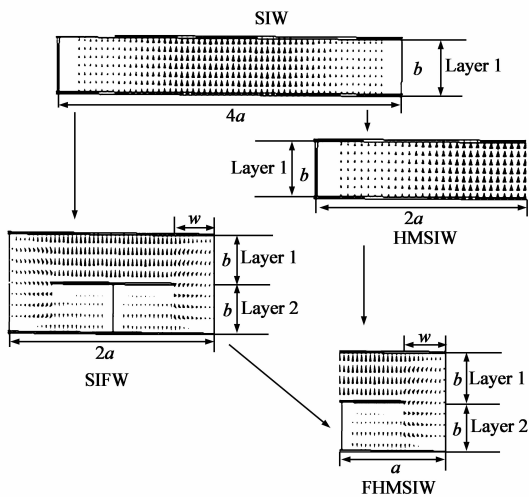


图1 由SIW、SIFW和HMSIW演变的FHMSIW横截面结构和主模电场分布

减小了系统体积,为实现高集成度、小体积、低损耗的微波毫米波系统提供了一种有效途径。

图2所示为FHMSIW的三维结构图.FHMSIW由两层PCB板、一排金属通孔和另一排金属盲孔制作,包括上层金属层、中间金属层和底层金属层.上层和底层金属覆盖于整个介质基片,而中间金属层与金属通孔之间有缝隙 w 以形成折叠模式.金属通孔在上下双层介质基片中,连接于上层金属层、中间金属层和底层金属层;金属盲孔只位于下层介质基片,连接于下层金属层和中间金属层。

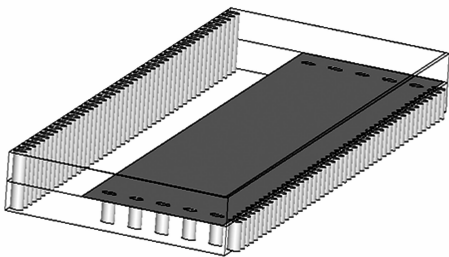
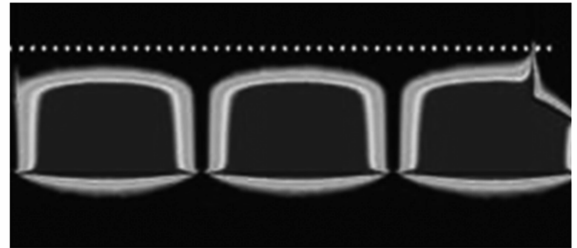


图2 FHMSIW三维结构示意图

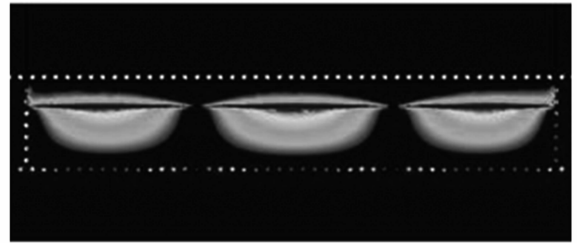
由于FHMSIW的宽高比较大(一般大于10),能量泄露极小,可以忽略不计.因此,FHMSIW保持了HMSIW的主模电场分布,只是电场从上层介质沿中间金属壁折叠到下层介质.FHMSIW的主模电场分布如图3所示,图3(a)是主模电场在上层介质的分布图,图3(b)是主模电场在下层介质的分布图.如果选择合适的 a 、 b 和 w ,FHMSIW的传播常数和HMSIW基本一致。

FHMSIW技术目前处于刚刚兴起的阶段,目前只有基于FHMSIW结构的定向耦合器发表^[14,15].因此还有许多理论问题需要研究,有很多应用领域亟待开拓.由于电场分布是从上层介质沿中间金属壁折叠到下层介质,因此可以在FHMSIW的上层金属和中间金属的表面开槽而形成滤波器。

本文设计了两种集成宽带FHMSIW带通滤波器,一种是槽缝蚀刻在上层金属层,另一种蚀刻在中间金属层.两个槽缝之间的一段折叠半模基片集成波导构成一个四分之一波长谐振器,通过改变槽缝的尺寸来控制谐振器之间耦合的强弱,使整个结构起到滤波器的效果.本文基于耦合矩阵综合和全波仿真相结合的方法设计滤波器.FHMSIW滤波器不但保持了HMSIW滤波器宽带、低插损的特性,同时进一步减小了尺寸。



(a) FHMSIW主模电场在上层介质中的场型图



(b) FHMSIW主模电场在下层介质中的场型图

图3 FHMSIW主模电场的场型图

2 滤波器的设计

这里设计的FHMSIW滤波器是由两层高度同为0.5mm的介质Rogers5880构成,缝隙 $w = 2\text{mm}$.金属化孔的半径 R_{via} 为0.2mm,间距 D_{via} 为0.8mm.图4和图5分别给出了FHMSIW中间金属层槽缝式滤波器和

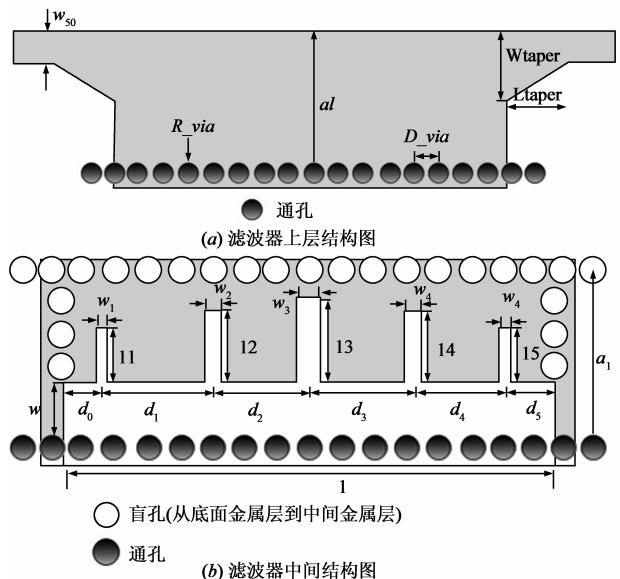


图4 FHMSIW中间金属层槽缝式滤波器结构图

FHMSIW 上层金属层槽缝式滤波器的结构示意图. 类似于 HMSIW 横槽式滤波器, 本文基于耦合矩阵综合理论与电磁仿真软件相结合的方法设计了 FHMSIW 槽缝式滤波器. 双缝之间的 FHMSIW 构成谐振腔, 耦合谐振器之间的耦合系数、谐振腔与输入输出端口的的外部耦合系数均由横槽的尺寸确定.

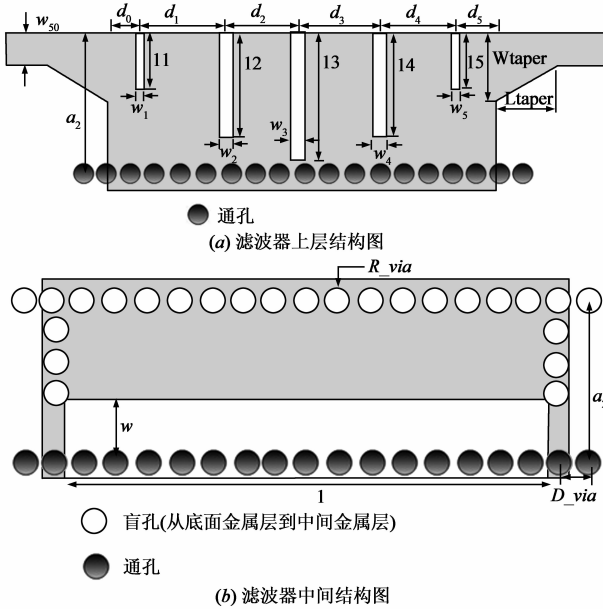


图5 FHMSIW 上层金属层槽缝式滤波器结构图

FHMSIW 槽缝式滤波器的设计方法可以大致分为以下几步:

(1) 选择合适的低通原型滤波器:

带通滤波器和低通原型滤波器之间的频率变换公式为^[12,16]:

$$\Omega = \frac{\Omega_c}{FBW} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (1)$$

$$FBW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \quad (2)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_2 \omega_1} \quad (3)$$

其中 Ω_c 低通滤波器的截止频率, ω_2 和 ω_1 是带通滤波器的上带边频率和下带边频率, ω_0 是通带中心频率, FBW 是低通滤波器的相对带宽. 然后根据滤波器的指标选择合适的低通原型滤波器及其阶数.

(2) 耦合系数及外部品质因数的计算:

根据低通原型元件值和相对带宽, 求出该滤波器的外部品质因数和耦合系数的值^[12,16]:

$$Q_1 = \frac{g_0 g_1 \Omega_c}{FBW} \quad (4)$$

$$K_{i,i+1} = \frac{FBW}{\Omega_c \sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (5)$$

$$Q_n = \frac{g_n g_{n+1} \Omega_c}{FBW} \quad (6)$$

其中, $g_i (i=0, \dots, n+1)$ 是低通滤波器原型参数, Q_1 和 Q_n 为低通滤波器外部品质因数, $K_{i,i+1}$ 为耦合系数.

(3) 等效电路的计算:

由设计的第二步求得外部品质因数和耦合系数的值以后, 可以根据公式求解出折叠半模基片集成波导谐振器的外部品质因数和折叠半模基片集成波导耦合谐振器的耦合系数^[12,16]:

$$Q_e = \frac{2f_0}{\Delta f_{-3dB}} \quad (7)$$

$$k = \pm \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \quad (8)$$

由于一定尺寸的槽缝对应着固定的 k 和 Q_e 的值, 所以可以利用计算机程序方便地求得合适的槽缝的尺寸.

(4) 利用仿真软件对设计结果作进一步优化以得到最好的效果.

(5) FHMSIW 滤波器的实现.

FHMSIW 传输线结构可以提供高通特性, 而槽缝谐振器可以提供带通滤波器, 所以本文将两者结合在一起设计宽带 FHMSIW 槽缝式滤波器. 由于其良好的高通特性, 因此带通滤波器在低频段具有很好的带外特性. 由于槽缝可以蚀刻在上层金属面也可以在中间金属面, 所以本文基于上面讨论的耦合矩阵理论设计了两种滤波器. 滤波器的截止频率和谐振腔的谐振频率可以通过仿真软件 Ansoft HFSS 仿真获得.

3 FHMSIW 仿真和测试结果

FHMSIW 中间金属层槽缝式和上层金属层槽缝式滤波器都是由高度为 0.5mm 的两层 Rogers5880 介质板制成, 缝隙 $w = 2\text{mm}$. 经过仿真软件 Ansoft HFSS 的优化, 其几何结构参数由表 1 和表 2 列出.

表 1 FHMSIW 中间金属层槽缝式滤波器尺寸

| Symbol | Quality(mm) | Symbol | Quality(mm) |
|--------|-------------|---------|-------------|
| R_via | 0.2 | Ltaper | 3.9 |
| D_via | 0.8 | Wltaper | 5.8 |
| W50 | 1.5 | a1 | 5.85 |
| l1 | 3 | w1 | 0.18 |
| l2 | 3.1 | w2 | 0.6 |
| l3 | 3.4 | w3 | 0.62 |
| d0 | 1 | d2 | 5.6 |
| d1 | 5.9 | w | 2 |

表 2 FHMSIW 上层金属层槽缝式滤波器尺寸

| Symbol | Quality(mm) | Symbol | Quality(mm) |
|--------|-------------|---------|-------------|
| R_via | 0.2 | Ltaper | 3.7 |
| D_via | 0.8 | Wltaper | 5.8 |
| W50 | 1.5 | a2 | 6.14 |
| l1 | 3.4 | w1 | 0.2 |

表 2 续

| Symbol | Quality (mm) | Symbol | Quality (mm) |
|--------|--------------|--------|--------------|
| l2 | 4.6 | w2 | 0.7 |
| l3 | 5.5 | w3 | 0.5 |
| d0 | 7.2 | d2 | 4.3 |
| d1 | 6.5 | w | 2 |

图 6 给出了两种滤波器的实物 PCB 图和测试结构图.图 7 和图 8 分别给出了 FHMSIW 中间金属层槽缝式滤波器和 FHMSIW 上层金属层槽缝式滤波器的仿真和测试结果图.

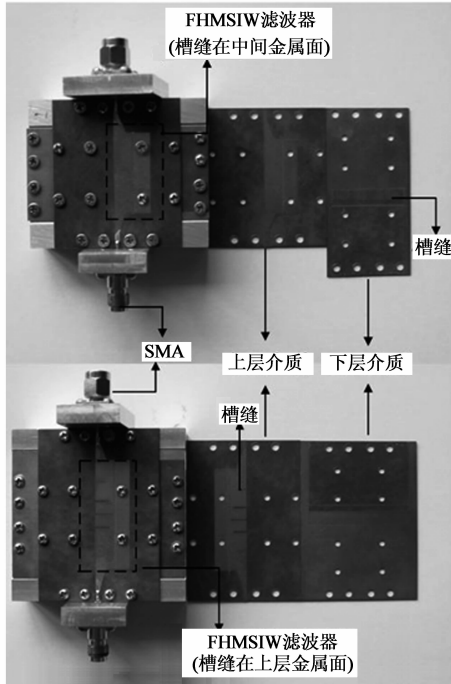


图 6 滤波器测试实物图和 PCB 版图

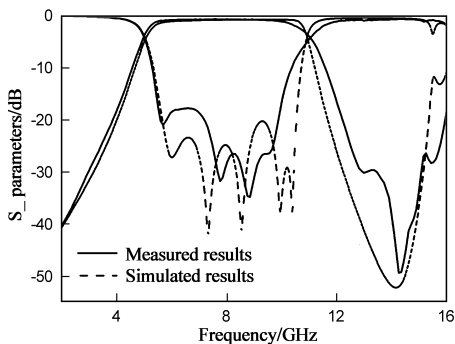


图 7 FHMSIW 中间金属层槽缝式滤波器的仿真和测试结果

由图 7 可以看到, FHMSIW 中间金属层槽缝式滤波器的中心频率为 8GHz, 相对工作带宽为 72%. 测试的插损在带宽内最大为 0.7dB, 在工作带宽内的测试反射系数低于 -17dB. 由图 8 可以看到, FHMSIW 上层金属层槽缝式滤波器的中心频率为 6.55GHz, 相对工作带宽为 47%. 测试的插损在带宽内最大为 0.77dB, 在工作带宽内的测试反射系数低于 -18dB. 所有测试结果包括了

50Ω 微带线到 FHMSIW 的渐变微带线、一对 0.35mm SMA 测试接头的影响. 由测试和仿真结果可以得出该滤波器损耗很小, 带外抑制好, 具有很宽的工作带宽, 而且分别在 14GHz 和 10GHz 出现了零点. 滤波器的寄生通带出现在通带频率的 3 倍处. 同时相对于 HMSIW 槽缝式滤波器, FHMSIW 槽缝式滤波器的尺寸进一步减小, 可提高微波毫米波平面电路的集成度.

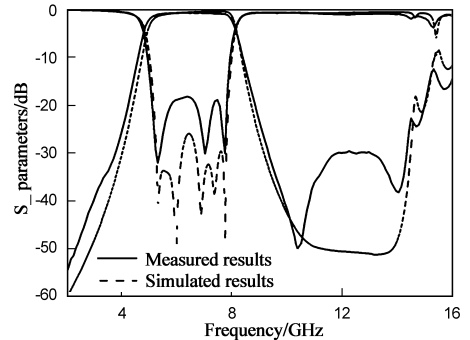


图 8 FHMSIW 上层金属层槽缝式滤波器的仿真和测试结果

4 结论

本文设计制作了两种集成宽带 FHMSIW 槽缝式滤波器. 这种结构继承了 SIW、HMSIW、SIFW 的低剖面、低成本、低损耗、易集成的优点, 同时进一步减小了尺寸, 提高了平面器件的集成度. FHMSIW 槽缝式滤波器使用双层 PCB 板制作成功, 其测试和仿真结果表明该滤波器具有宽带、低损耗、选择性好的优良特性, 可以广泛应用于微波毫米波系统中电路的设计.

参考文献:

- [1] A Atia, A E Williams. Narrow-bandpass waveguide filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1972, 20(4): 258 - 265.
- [2] R J Cameron. General coupling matrix synthesis methods for Chebyshev filtering functions[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(4): 433 - 442.
- [3] S Caspi, J Adelman. Design of combline and interdigital filters with tapped-line input[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1988, 36(4): 759 - 763.
- [4] D Deslandes, K Wu. Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2001, 11(2): 68 - 70.
- [5] Feng Xu, Yulin Zhang, et al. Finite-difference frequency-domain algorithm for modeling guided-wave properties of substrate integrated waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(11): 2221 - 2227.
- [6] Z C Hao, W Hong, J X Chen, X P Chen, K Wu. Compact super-wide bandpass substrate integrated waveguide (SIW) filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,

- 2005, 53(9):2968 – 2977.
- [7] Y L Zhang, W Hong, K Wu, J X Chen, H J Tang. Novel substrate integrated waveguide cavity filter with defected ground structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(4):1280 – 1287.
- [8] Hongjun Tang, Wei Hong, Jixin Chen, Guoqing Luo, Ke Wu. Development of millimeter-wave planar duplexers based on complementary characters of dual-mode substrate integrated waveguide filters with circular and elliptic cavities development of millimeter-wave planar duplexers based on complementary characters of dual-mode substrate integrated waveguide filters with circular and elliptic cavities[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 155(4):776 – 782.
- [9] W Hong, Y Wang, Q H Lai, B Liu (Keynote Talk). Half mode substrate integrated waveguide; a new guided wave structure for microwave and millimeter wave application[A]. Joint 31st International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics[C]. Shanghai: IEEE Press, 2006, 18 – 22.
- [10] 刘冰, 洪伟, 郝张成, 陈继新. 基片集成波导梳状交替相位功分器[J]. 电子学报, 2007, 35(6):1061 – 1064.
Liu Bing, Hong Wei, Hao Zhang-cheng, Chen Ji-xin. Alternate phase substrate integrated waveguide (SIW) power divider [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6):1061 – 1064. (in Chinese)
- [11] N Grigoropoulos, B Sanz Izquierdo, P R Young. Substrate integrated folded waveguides (SIFW) and filters[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(12):829 – 831.
- [12] Y Q Wang, W Hong, Y D Dong, B Liu, H J Tang, et al. Half mode substrate integrated waveguide filter [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(4):265 – 267.
- [13] Yujian Cheng, Wei Hong, Ke Wu. Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) directional filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(7):504 – 506.
- [14] G H Zhai, W Hong, K Wu, P Chen, J X Chen, J Wei, H J Tang. Folded half mode substrate integrated folded waveguide 3dB coupler[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(8):512 – 514.
- [15] Wei Hong. Research advances in SIW, HMSIW and FHMSIW [A]. China-Japan Joint Microwave Conference [C]. IEEE Press, 2008. 357 – 358.
- [16] J S Hong, M J Lancaster. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. New York: Wiley, 2001. 235 – 271.

作者简介:



翟国华 男, 1981 年生于山东济宁. 于 2009 年在东南大学信息科学与工程学院毫米波国家重点实验室获博士学位. 现为华东师范大学信息科学技术学院讲师. 研究方向为微波毫米波无源器件及天线系统设计.

E-mail: ghzhai@emfield.org



洪伟 男, 1962 年生于河北. 长江学者特聘教授、博士生导师. 1982 年于解放军信息工程大学获学士学位, 分别于 1985 年、1988 年在东南大学获硕士、博士学位. 现为东南大学毫米波国家重点实验室主任、IEEE Transactions on MTT 副主编. 研究方向为微波毫米波理论与技术、无线通信中的射频与天线技术及计算电磁学.