

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210463

一种太赫兹宽带三次谐波混频器设计与实现*

蒋 姝¹ 苏格诺¹ 杨会军¹ 余 雨¹ 葛仕奇²

(1.南京工程学院 南京 211167; 2.南京电子技术研究所 南京 210008)

摘要:提出了一种基于紧凑型过渡结构的低变频损耗太赫兹宽带三次谐波混频器。混频器中的紧凑型过渡结构,位于射频端波导内部,由电路正面的悬置带线和背面的三角形过渡段两部分组成,用于提高混频器的带宽,优化变频损耗。其中,悬置带线末端位于波导内射频信号电场的最大值处,正上方放置具有一对串联肖特基结的混频二极管,形成单平衡混频电路,使得射频信号仅与本振信号的奇次谐波混频,减少无效谐波分量。背面的三角形过渡段降低了悬置带线与射频波导之间的不连续性,有利于实现宽带匹配及混频电路小型化。混频器电路介质基板总尺寸为 $5.1\text{ mm}\times 6.9\text{ mm}\times 0.127\text{ mm}$,实测结果表明,在 $135\sim 165\text{ GHz}$ 范围,混频器的单边带变频损耗为 $10.8\sim 15.7\text{ dB}$,典型值为 13.0 dB ,中频频率范围为 $0\sim 15\text{ GHz}$ 。

关键词:太赫兹;宽带;三次谐波混频器

中图分类号: TN773 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Design and implementation of terahertz wideband third-harmonic mixer

Jiang Shu¹ Su Genuo¹ Yang Huijun¹ Yu Yu¹ Ge Shiqi²

(1. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210008, China)

Abstract: A fixed-tuned D-band third-harmonic mixer is presented with broad bandwidth and low conversion loss (CL) based on a compact transition-match structure (CTMS). The CTMS is composed of a short suspended stripline (SSLIN) on the top side and a triangle-shaped transition on the bottom side, located in the radio frequency (RF) waveguide. The mixing diode with two Schottky junctions in series is located directly on the short SSLIN in the RF waveguide, designed to be at the maximum of the electrical field of the RF signal. The single balanced configuration is then achieved, and the RF signal is only mixed with the odd harmonics of the local oscillator (LO) signal. The triangle-shaped transition helps to minimize the discontinuity between the waveguide and the microstrip circuits. The mixing circuit is miniaturized and the mixer bandwidth is broadened benefiting from the CTMS. Dimension of the circuit substrate is $5.1\text{ mm}\times 6.9\text{ mm}\times 0.127\text{ mm}$. The measured results indicate that the single-side band (SSB) CL of the mixer is typically 13.0 dB , and ranges from 10.8 dB to 15.7 dB over $135\sim 165\text{ GHz}$. The instantaneous intermediate frequency (IF) is available up to 15 GHz .

Keywords: terahertz (THz); wideband; third-harmonic mixer

0 引 言

在成像探测、无损检测、辐射计、测量仪器等毫米波太赫兹应用系统当中,噪声系数和工作带宽是决定系统总体性能的关键指标之一^[1-5]。低噪声放大器和混频器,是系统接收机输入端紧邻天线的两级重要部件,决定了系统的噪声系数和带宽。在毫米波及以下频段,低噪声放大器制造

技术发展成熟,能够有效保证噪声系数和带宽参数满足应用需求。在太赫兹低端频段,单片集成电路技术已经能够实现低噪声放大器,但成本极高,难以广泛应用于上述应用系统^[6-7]。如果结合外差式接收机架构,可以使用无低噪设计,直接采用混频器将接收到的太赫兹信号直接下变频至更易处理的中频信号,则可以大幅降低太赫兹应用系统的实现难度和成本。

收稿日期:2022-06-25

* 基金项目:江苏省自然科学基金青年基金(BK20201044)、江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(22KJB510023)、南京工程学院引进人才科研启动基金(YKJ201973)项目资助

在无低噪放或者较低增益低噪放的超外差系统中,混频器的变频损耗和带宽决定了系统噪声系数和工作带宽。而混频器的本振信号质量和功率则决定了这两个指标的优劣水平。受限于功放技术水平,在太赫兹频段,足够功率的本振信号不容易实现。因此,通常使用谐波混频器来降低本振信号频率^[8-10]。近年来,采用反向并联二极管对的偶次谐波混频器较为常见,并且在毫米波和太赫兹频段都已经实现了较好的性能^[11-14]。Bryllert 团队以及 Cui 团队均实现了 Y 波段二次谐波混频器,相对带宽分别为 9% 和 18%,变频损耗分别达到了 16 dB 和 12.4 dB 左右^[10-12]。

与偶次谐波混频器相比,奇次谐波混频器的相关报道较少。目前已有 W 波段三次谐波混频器相关文献报道^[15],变频损耗约为 12 dB,几乎达到了二次谐波混频器的性能水平,然而带宽仅为 1.2%。这是由于传统奇次谐波混频器通常采用 crossbar 结构实现单平衡配置,该结构很难在射频端口引入匹配电路。同时为了减小变频损耗,太赫兹频段的混频器电路通常采用石英基片,然而石英基片难以制作结构复杂的匹配结构。上述因素限制了奇次谐波混频器实际性能,并且加工成本较高。另外,在射频端使用减高波导可以优化端接阻抗,增大带宽^[16]。然而,减高波导匹配法难以实现小型化。综上所述,近年来谐波混频器仍然以偶次谐波设计为主^[17-18]。

为了进一步提升奇次谐波混频器性能,实现宽带、低变频损耗特性,本文提出了一种由悬置带线和三角形过渡段两部分组成的紧凑型过渡结构,基于这一结构设计并实现了一种 135~165 GHz 低变频损耗三次谐波混频器。该混频器采用 Rogers 5880 基片替代石英基片进行整体设计,降低了紧凑型过渡结构的加工难度。不仅变频损耗、工作带宽等关键性能与二次谐波混频器相当,同时能够将所需的本振信号由 150 GHz 降为 50 GHz 左右。在保证性能优势的同时,电路结构简单紧凑,进一步降低了系统集成成本,适用于太赫兹相关应用系统设计。

1 电路原理

设计奇次谐波混频器,需要采用反向并联到地的二极管对,形成单平衡混频结构,电路原理如图 1 所示。反向并联二极管对位于射频波导内,与射频波导短路面的距离为 $\lambda_{RF,TE10}/4$ ($\lambda_{RF,TE10}$ 是 TE10 模式下射频信号的波长)。该距离确保二极管位于射频信号电场的最大值处,将射频信号的损耗降至最低。

如图 1 所示,施加在混频器反向二极管对两端的射频信号电压 v_{RF} 同相,施加在二极管对两端的本振信号电压 v_{LO} 反相。因此,其中一个二极管由本振和射频信号同相驱动,另一个则是反相驱动,从而形成了混合器的单平衡配置,所得到的混频产品输出电流 i_3 可以表示为:

$$i_3(\omega) \propto \sum i_{IF(2n+1)} \cdot \cos[\omega_{RF}t - (2n+1)\omega_{LO}t] \quad (1)$$

其中, $(2n+1)$ 为混频产物的谐波次数。 $i_{IF(2n+1)}$ 是相应

混频产物的输出电流。当 $n=0$ 时,式(1)包含了所有的奇次谐波混频产物分量,本振信号的偶次谐波分量被单平衡配置抵消。在此基础上,在中频端采用所需频段的低通滤波器,可以提取三次谐波混频产物,对应频率为:

$$f_{IF} = |f_{RF} - 3f_{LO}| \quad (2)$$

二极管并联到地,可以得到较低的中频阻抗,该阻抗值更容易与宽带微带电路匹配。相对于射频信号,二极管对是串联结构,阻抗较大,更容易与波导匹配。然而,不同于本振端和中频端,在射频端电路结构在波导、悬置带线、微带线之间直接突变,结构变化导致明显的不连续性,因此在射频波导端口需要有效的匹配解决方案,以保证信号有效施加在二极管两端,减小信号损失,实现宽带特性。

2 关键无源电路设计

依据三次谐波混频器电路原理分析可知,除了关键的反向并联二极管对、射频端紧凑型过渡结构以外,混频器电路还需要关键无源电路,包括:开路枝节、本振端波导微带过渡探针、中频端低通滤波器,如图 1 所示。

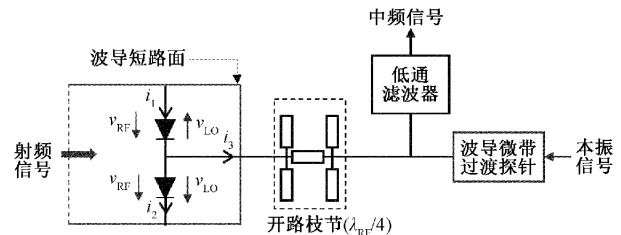


图 1 三次谐波混频器电路原理简图

在邻近二极管焊盘处,采用两级对称的四分之一射频信号波长 ($\lambda_{RF}/4$) 的开路枝节,抑制射频信号传输至本振或者中频端,使得射频信号最大程度施加在二极管对上。对于本振信号而言,其频率为射频信号的 1/3,开路枝节对本振信号没有影响,本振信号可以顺利通过开路枝节并施加在二极管对两端。中频低通滤波器则用于低损耗通过中频信号,对本振及其各次谐波和射频信号全反射。混频器整体电路仿真优化时,通过调节各枝节尺寸,对二极管对两端闲散频率反射相位进行综合调节,实现最佳回收利用,从而达到降低混频器变频损耗的目的。

为了简化混频器设计,在进行整体仿真之前,首先对混频器的各无源电路分别优化。各电路结构和 S 参数仿真曲线如图 2~4 所示。经过优化后,开路枝节在 135~165 GHz 内抑制度优于 20 dB,在 45~55 GHz 范围内回波损耗优于 10 dB,如图 2 所示;本振端波导微带过渡探针在 45~55 GHz 范围内回波损耗优于 25 dB,如图 3 所示;中频端低通滤波器在 15 GHz 以内回波损耗优于 10 dB,在本振信号频段抑制优于 30 dB,如图 4 所示。因此在中频端,射频信号和本振信号能够被完全隔离;在本振端,中频信号低于本振波导截止频率被隔离,射频信号无法通过开路枝节也被隔离;在射频端,本振信号和中频信号均低于射频波导截止频率,被

隔离。因此在混频器设计中采用上述无源电路,则各端口之间的隔离度同时得到了优化。

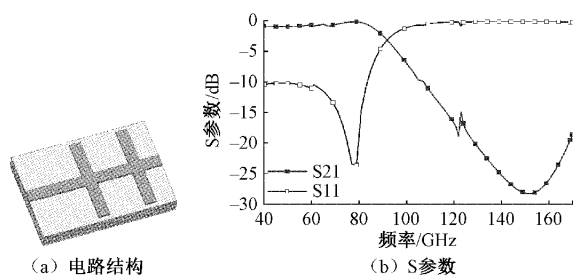


图 2 开路枝节

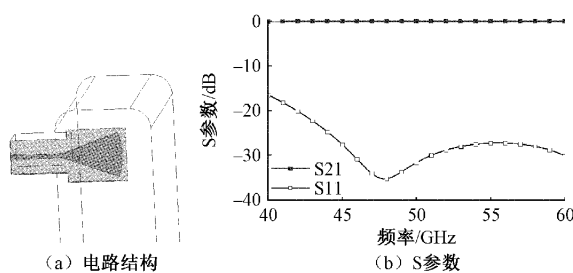


图 3 本振端波导微带过渡探针

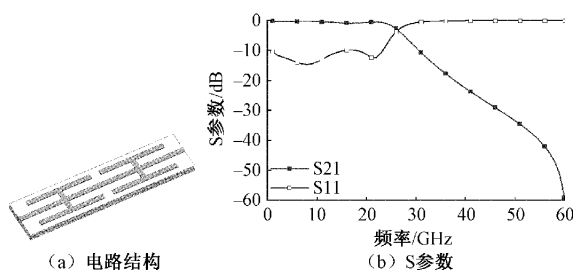


图 4 中频端低通滤波器

3 紧凑型过渡结构及混频器整体电路设计

完成开路枝节、本振端波导微带过渡探针、中频端低通滤波器等关键无源电路的初步优化后,将上述电路模型与反向二极管对、紧凑型过渡结构级联,采用仿真软件 HFSS 建立三次谐波混频器的整体电路,如图 5 所示。在模型中,微带电路基片采用 Rogers-RT/Duroid 5880,厚度为 0.127 mm,介电常数 2.2。通过整体电路级联仿真,可以消除分立仿真时交界面处不连续性的影响。可以在二极管两端,通过调节接地通孔与二极管的距离优化变频损耗。可以通过调节开路枝节、低通滤波器尺寸优化输入输出匹配阻抗,使得仿真结果更加准确可靠,更容易实现宽带匹配。在射频端,采用二极管对连接大片接地通孔的方式实现短路接地,能够解决毫米波短路枝截线射频接地不良的问题。

在仿真软件 HFSS 中完成混频器三维电磁模型仿真后,导出混频器整体电路模型的小信号 S 参数,然后导入电路仿真软件 ADS,进行非线性谐波平衡仿真,电路连接方式如

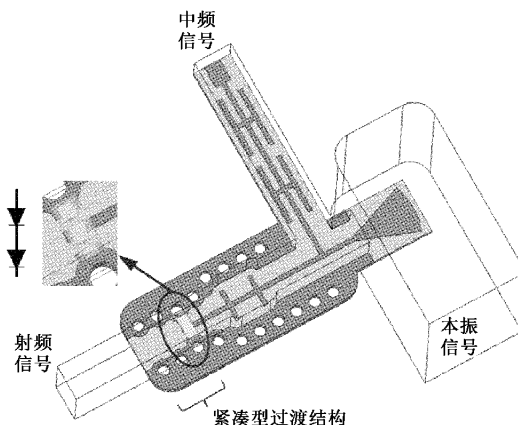


图 5 太赫兹三次谐波混频器三维电磁模型

图 6 所示。通过非线性谐波平衡仿真,可以得到谐波混频器的变频损耗等性能指标。依据混频器性能仿真结果调整混频器三维电磁模型尺寸,多次迭代后,可以得到最优结果。

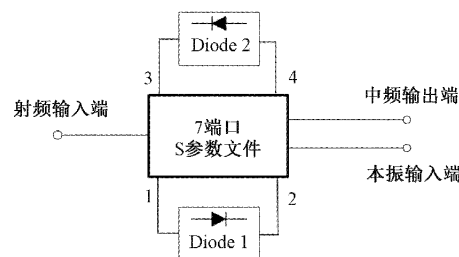


图 6 混频器谐波平衡仿真模型

本文提出的紧凑型过渡结构位于混频器射频端波导内,是决定混频器性能的关键电路,电路结构和所处位置如图 5 和 7 所示。

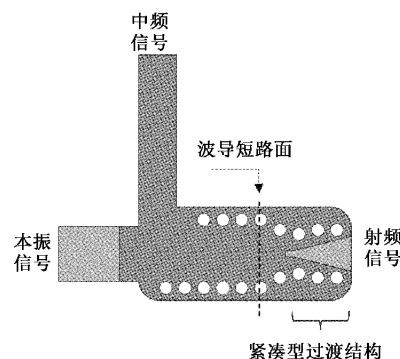


图 7 背面电路及紧凑型过渡结构示意图

除两侧接地通孔外,紧凑型过渡结构由两部分组成:1)位于混频器电路正面的悬置带线,用于焊接反向二极管对,如图 5 所示;2)位于混频器电路背面的三角形过渡,如图 7 所示。图中,电路镀金区域用橙色(深色)表示,基板为灰色(浅色)。混频二极管对采用 UMS 提供的倒装片肖特基二极管 DBES105a,单管内部包含两个同向串联的肖特基结,如图 8 所示,因此该设计中只需要采用单片 DBES105a 即可。

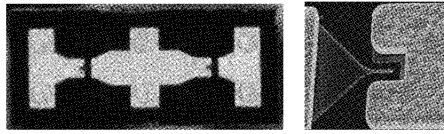


图 8 具有双肖特基结的混频二极管

单片肖特基二极管 DBES105a 安装在紧凑型过渡结构正面的悬置带线上,距离射频端波导短路面为 $\lambda_{RF,TE10}/4$,以将射频信号的损失降至最低。图 7 所示三角形过渡,经过整体电路级联优化后,总长度约为 1.2 mm。它将射频端波导与微带电路之间的不连续性降至最低。射频信号与本振信号在紧凑型过渡结构及射频端波导中的电场方向和传输方式如图 9 所示。

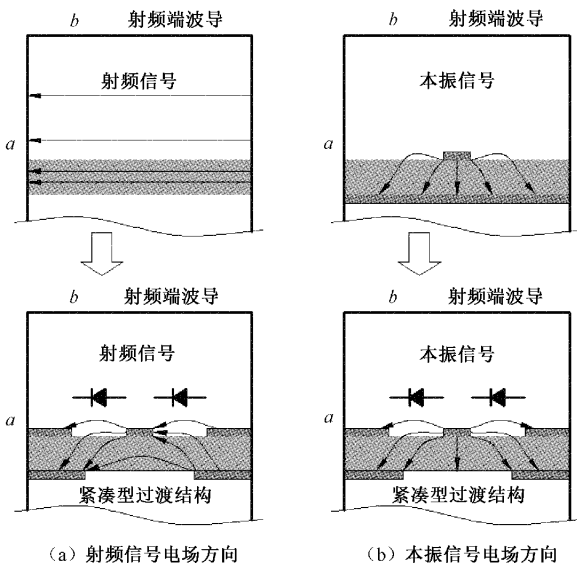


图 9 紧凑型过渡结构与射频波导内部电场示意图

图 9 截取了紧凑型过渡结构和射频端波导的某一横截面处的电场方向,图中射频端波导的宽边和窄边分别标注 a 、 b 。图 9(a)说明了射频信号传输至二极管对的过程:射频信号经由射频端波导输入,传输至紧凑型过渡结构中的悬置带线,最后到达二极管对。这一过程中,当电场由波导传输至紧凑型过渡结构时,电场首先与波导的 TE_{10} 模式平行,然后逐渐集中在悬置带线附近,最终同相施加在肖特基结。图 9(b)说明了本振信号传输至二极管对的过程:本振信号从微带线传输至紧凑型过渡结构中的悬置带线,此时其电场仍然类似于 TEM 模式电场,然后集中在悬置带线附近,最终反相施加于二极管肖特基结中。上述传输匹配状态得益于优化后的三角形过渡区域。

该混频器电路整体采用 E 面设计,射频端和本振端波导均可从 E 面中心剖分成上下两个腔体部分,从而减小结构件加工装配可能引入的不连续性。

4 实验结果

太赫兹三次谐波混频器实物照片如图 10 所示。混频

器腔体采用硬铝加工制作,射频和本振端口分别采用标准波导 WR-06 和 WR-19,中频端口采用 SMA-F 连接器。内部混频二极管通过导电胶焊接到电路介质基板上。混频器外形总尺寸为 28 mm×22 mm×20 mm。

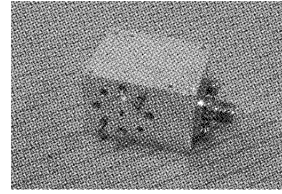


图 10 太赫兹三次谐波混频器实物

混频器变频损耗测试,采用两台信号源 Agilent E8257D 分别激励射频和本振链路,其中一台驱动 D 波段倍频链路,输出 135~165 GHz 射频信号,射频功率由功率计 DPM-2A 测量校准。另一台信号源驱动 U 波段倍频器输出 U 波段本振信号,通过调节信号源输出功率,将本振信号功率稳定在 +13 dBm 左右。混频器中频信号频率和功率由频谱仪 Agilent E4407B 测量,通过计算得出混频器实际单边带变频损耗,测量结果如图 11 所示。当本振频率固定在 50 GHz,射频功率电平为 -5 dBm 时,在 135~165 GHz 范围内,单边带变频损耗为 10.8~15.7 dB,典型值为 13.0 dB,中频频率可以覆盖至 15 GHz。

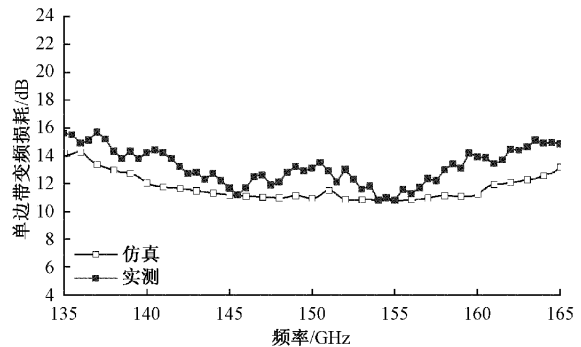


图 11 太赫兹三次谐波混频器变频损耗实测结果

表 1 为本文所提出的混频器与已报道的肖特基混频器在类似频段(W 频段~G 频段)的性能比较。理论上,变频损耗随介质基板厚度和混频器谐波次数的增加而增加。本文所提出的混频器,采用的是较厚的介质基板(127 μm),且谐波次数较高为 3,但其性能与已报道的二次谐波混频器相当。并且,相对带宽 RBW 达到了 20%,在拓宽带宽方面也具有显著优势。

表 1 谐波混频器性能指标对比

文献	频率/GHz	RBW/%	N	h/ μm	SSB CL/dB
[10]	220~240	9	2	≥ 50	16 typ.
[12]	199~238	18	2	50	7.84~12.4
[14]	211~226	7	2	50	<12
[15]	95.4	1.2	3	50	12.0
本文	135~165	20	3	127	13.0 typ.

5 结 论

基于紧凑型过渡结构,设计、制作并测试一种 135~165 GHz 宽带低变频损耗三次谐波混频器。该紧凑型过渡结构由电路正面的悬置带线和背面的三角形过渡组成,有效降低了结构尺寸、减小电路不连续性并拓宽了工作带宽。将关键无源电路的初步优化设计,与混频器整体电路的一体化设计相结合,有效提升了混频器性能,提高了仿真设计的准确性。测量结果表明,在 135~165 GHz 范围内,混频器单边带变频器损耗为 10.8~15.7 dB,典型值为 13.0 dB。中频频率可以覆盖至 15 GHz。该混频器在 20% 相对带宽范围内实现了低变频损耗和高平坦度特性,为宽带应用系统前端设计提供了一种低成本、高实用性的解决方案。

参考文献

- [1] BASSLI A, BLIN S, NOUVEL P, et al. 3-D imaging of materials at 0.1 THz for inner-defect detection using a frequency-modulated continuous-wave radar [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(8):5843-5852.
- [2] HUANG R, CHIANG W C, LIANG C J, et al. A W-Band 4 GHz BW multiuser interference-tolerant radar with 28-nm CMOS front ends [J]. IEEE Solid-State Circuits Letters, 2020, 3:414-417.
- [3] 刘敬坤,李继森,孙凯. 矢量网络分析仪大动态范围接收机设计 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12): 131-134.
- [4] 徐天琪,杜磊,张殿龙. 基于虚拟仪器技术的 77 GHz 毫米波雷达目标运动参数模拟校准装置 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 118-125.
- [5] 郑睿,李方东. 基于调频毫米波的安防移动机器人导航系统 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 105-113.
- [6] RODIONOV D, EFIMO A, KHLYBOV A, et al. 120 GHz band MMIC SiGe receiver [C]. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021: 2600-2603.
- [7] FLORIAN C, TRAVERSO P A, SANTARELLI A. A Ka-band MMIC LNA in GaN-on-Si 100-nm technology for high dynamic range radar receivers [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 31(2):161-164.
- [8] 王宇星,雷志勇. 8 mm 波段四次谐波混频器的设计与仿真 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(4): 55-60.
- [9] ZHANG B, PI Y. Terahertz imaging radar with inverse aperture synthesis techniques: System structure, signal processing, and experiment results [J]. IEEE Sens. J., 2015, 15(1):290-299.
- [10] BRYLLERT T, DRAKINSKIY V, COOPER K B, et al. Integrated 200 ~ 240 GHz FMCW radar transceiver module [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2013, 61(10):3808-3815.
- [11] ZHAN Z M, ZHAO W, XU R M. Design of millimeter-wave wideband mixer with a novel IF block [J]. Prog. Electromagn. Res. C, 2012, 30:41-52.
- [12] CUI J, ZHANG Y, LIU X, et al. Design of 199 to 238 GHz broadband subharmonic mixer combining two-stage reduced matching technology with global design method [J]. Int. J. Numer. Model., 2019, DOI: 10.1002/jnm.2581.
- [13] LIU G, LI J, XU H, et al. Design of a 220 GHz subharmonic mixer based on planar schottky diode [C]. IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2017:418-421.
- [14] ZHANG Y, ZHAO W, WANG Y, et al. A 220 GHz subharmonic mixer based on schottky diodes with an accurate terahertz diode model [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2016, 58(10):2311-2316.
- [15] HUANG Y, HUI W, ALDERMAN B. A W band third-harmonic mixer using planar Schottky diodes [C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Chengdu, China, 2018: 1-3.
- [16] CHEN Z, CHEN X, CUI W, et al. A high-power G-band schottky local oscillator chain for submillimeter wave heterodyne detection [J]. J. Infrared Millim. Terahertz Waves, 2015, 36(5):430-444.
- [17] DOU J, MA J, SHEN T, et al. An effective analysis method for millimeter-wave broadband mixers [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 31(6):587-589.
- [18] JIANG S, WEI J, XU J, et al. A third-harmonic mixer using balanced diode configuration at W-band frequencies [C]. Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2015:1-3.

作者简介

蒋姝,博士,讲师,主要研究方向为微波毫米波电路与组件。

E-mail:jiangshu_hi@126.com