

应用于探测的 220 GHz 收发前端*

何月^{1,2}, 田遥岭^{1,2}, 刘戈^{1,2}, 黄昆^{1,2}, 邓贤进^{1,2}, 苏伟²

(1. 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心, 四川成都 610200;

2. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川绵阳 621900)

摘要:基于太赫兹肖特基二极管的强非线性特性,采用多次谐波倍频和混频的方式,研制了可应用于连续波频率调制雷达探测的紧凑型 220 GHz 收发前端。为了使接收机实现高功率输出,220 GHz 三倍频器的功放驱动采用 4 路功率合成的方式,实现 70 GHz 300 mW 高功率功率放大器模块,70 GHz 高抑制度 7 阶腔体带通滤波器抑制高次谐波信号。为了使接收机具有高灵敏度,220 GHz 谐波混频器采用 hammer-head 抑制结构和二极管精确噪声模型设计电路结构,接收中频链路采用开关控制来实现动态范围大于 60 dB 动态增益控制。220 GHz 收发前端在 215 ~ 225 GHz 范围内实现了高于 10 mW 的最大功率输出,接收机最低噪声系数小于 7 dB,增益动态范围大于 60 dB(-7 ~ 54 dB)。

关键词:倍频器;混频器;肖特基二极管

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2022)01-034-06

220 GHz transceiver front end for detection

HE Yue^{1,2}, TIAN Yaoling^{1,2}, LIU Ge^{1,2}, HUANG Kun^{1,2}, DENG Xianjin^{1,2}, SU Wei²

(1. Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610200, China;

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on the strong nonlinear characteristics of terahertz schottky diode, a compact 220 GHz transceiver front-end for continuous wave frequency modulation radar detection was developed by using multiple harmonic frequency doubling and mixing method. In order to realize the transmitter with high power output, the power amplifier driver of 220 GHz frequency multiplier adopted 4-way power synthesis method to realize 70 GHz 300 mW high-power power amplifier module, and 70 GHz high suppression 7th order cavity bandpass filter to suppress high-order harmonic signal. In order to achieve a high sensitivity receiver, the 220 GHz harmonic mixer adopted hammer-head suppression structure and diode precise noise model to design the circuit structure, and the IF link adopted switch control to achieve dynamic gain control with dynamic range greater than 60 dB. The 220 GHz transceiver front-end achieves a maximum power output of more than 10 mW in the range of 215 ~ 225 GHz. The minimum noise figure of the receiver is less than 7 dB, and the gain dynamic range is greater than 60 dB (-7 ~ 54 dB).

Keywords: frequency multiplier; mixer; Schottky diode

太赫兹技术是目前信息科学技术研究前沿与热点领域之一^[1-4],其中基于固态电子学的电路级联来实现的太赫兹源和检测器,结构相对紧凑,容易集成系统,而且可以在室温环境下工作,是目前实现高功率太赫兹源和高灵敏度太赫兹接收的一种重要方法^[5-13]。基于固态电子学的太赫兹雷达探测手段已逐渐走上应用,在机场安检、跑道异物检测、缩比模型雷达散射截面测量等方面具有重要用途。在太赫兹雷达探测应用中,对太赫兹收发链路前端的功率、相位噪声、噪声系数和灵敏度有着较高的要求,因此在设计太赫兹前端过

程中,需要尽可能提高输出功率和接收机的噪声系数指标。

1 220 GHz 收发前端方案

220 GHz 发射前端采用 Ka 波段二倍频器、V 波段二倍频器、高阶 E 波段带通滤波器、E 波段多路合成功率放大器以及基于肖特基二极管的 220 GHz 三倍频器实现多级倍频放大。220 GHz 接收前端采用 Q 波段放大器、基于肖特基二极管的 110 GHz 二倍频器和 220 GHz 谐波混频器以及中频放大链路,其中中频放大链路采用中频低噪

* 收稿日期:2021-01-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB1801504);中国工程物理研究院院长基金资助项目(YZJLX2018009)

作者简介:何月(1988—),男,湖南衡阳人,副研究员,博士研究生,E-mail:heyue_mtrc@caep.cn;

苏伟(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:weisu@caep.cn

放、中频滤波器、中频可调衰减器。220 GHz 发射和接收前端原理如图 1 和图 2 所示。

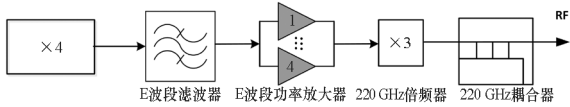


图 1 220 GHz 发射前端原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of 220 GHz transmitter front end

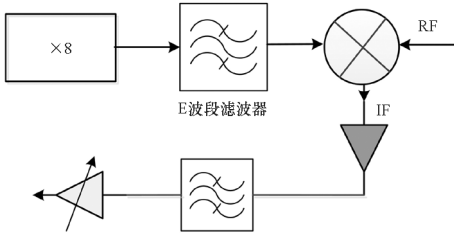


图 2 220 GHz 接收前端原理框图

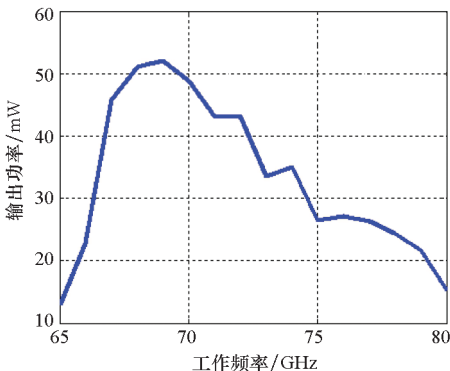
Fig. 2 Principle block diagram of 220 GHz receiver front end

2 220 GHz 发射前端

发射前端主要性能指标包括发射功率 P_{RF} 、

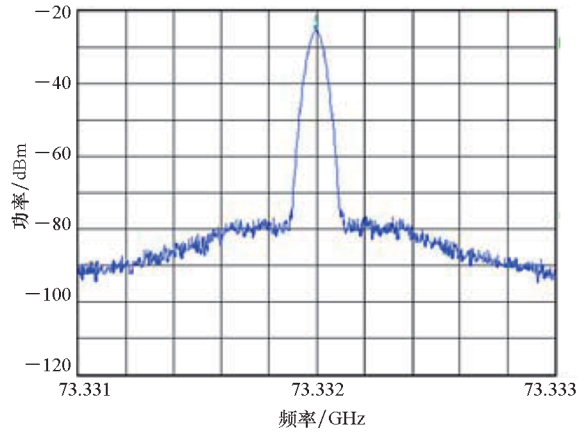
发射信号谐波抑制、信号带宽等。发射前端中 E 波段四倍频器采用 Ka 二倍频器和 E 波段二倍频器组成,中间会存在交调分量,因此后级 E 波段滤波器需要对高阶谐波分量进行抑制,同时保证低损耗传输,以保证发射信号的信噪比。为了实现太赫兹发射功率强度,需要保证 E 波段功率合成器的输出功率,以推动后级倍频器功率输出。

E 波段四倍频采用商用芯片公司的芯片实现。传输线采用 0.254 mm 厚度的 Rogers 5880,微带线线宽为 0.74 mm。采用电磁仿真软件 HFSS 进行腔体谐振点以及无源探针结构、弯波导结构仿真。图 3 显示了 E 波段 4 倍频器输出



(a) 输出功率

(a) Output power



(b) 频谱特性

(b) Spectral characteristics

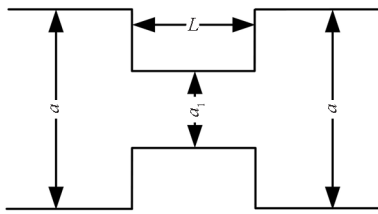
图 3 E 波段倍频器测试结果

Fig. 3 Measured results of E-band frequency multiplier

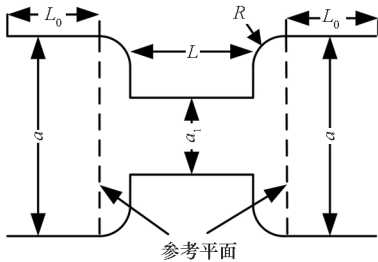
功率的测试结果,在 66 ~ 79 GHz 频率范围内,输出功率大于 20 mW,最大值出现 69 GHz 处为 52 mW,为了测试 E 波段四倍频器的频谱特性,采用频谱扩展进行 73 GHz 处频率特性测试如图 3 所示,可以发现信号无杂散,信号质量良好。

E 波段滤波器的主要作用为滤除输入信号的 4 次谐波以外的谐波信号,保证输出信号的杂散信号的抑制。设计中的带通滤波器采用切比雪夫低通原型滤波器设计。经过前面分析,倍频器主要的谐波分量为三次谐波和五次谐波,因此设定 E 波段滤波器的中频频率为 73 GHz,带宽为 9 GHz,带外抑制大于 30 dB (下边带 53.25 ~ 57.00 GHz,上边带 85 ~ 96 GHz)。采用切比雪夫低通原型滤波器的衰减特性公式计算滤波器的阶数 n 为 7。E 波段波导滤波器采用 H 面阶梯耦合窗口实现,但在实际加工中很难加工垂直的转角,一般在外直角处倒一定的圆弧。采用传统矩形波导模式匹配法无法计算引入圆弧的 S 参数,因此需要对圆弧处的阻抗变换器进行计算。在三维电磁仿真软件中仿真图 4 所示结构模型,得到 S 参数,根据电路理论采用 $ABCD$ 矩阵可以得到 K 变换器的参数值。由对应的 K 值与附加相移值,扫描阶梯的宽度 a_1 即可获得所需的 K 值,再调节每个谐振器长度 L 实现相应频率的谐振,从而产生所需的滤波器结构。

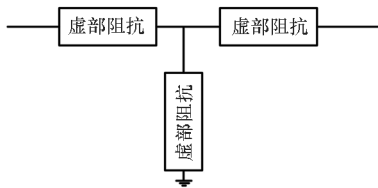
最终在电磁仿真软件中建立如图 5 (a) 所示仿真模型,图 5 (b) 展示了考虑倒圆角的矩形系数,得到 E 波段滤波器仿真结果,69 ~ 79 GHz 频率范围内插损小于 0.3 dB,反射系数小于



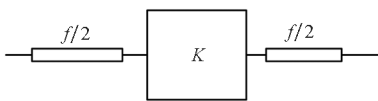
(a) 理想阶梯模型
(a) Ideal step model



(b) 引入倒角的阶梯模型
(b) Step model with chamfering



(c) 等效电路
(c) Equivalent circuit



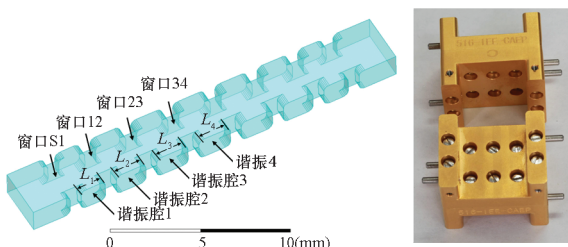
(d) K 变换等效电路
(d) K-transform equivalent circuit

图 4 波导滤波器 H 面不连续等效模型

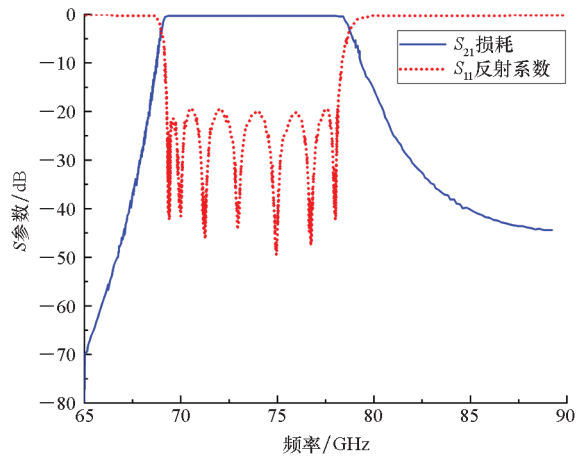
Fig.4 Equivalent model of H-plane discontinuity in waveguide filter

-20 dB,在三次谐波和五次谐波处抑制大于 35 dB,满足设计要求。

为了实现 220 GHz 发射前端足够功率(大于 10 mW)的输出,前级驱动放大器的功率必须足够大,采用商用芯片 4 路合成来实现。对于单个芯片跟 E 波段四倍频器一样,为防止芯片腔体内部



(a) 仿真模型与加工实物图
(a) Simulated model and object



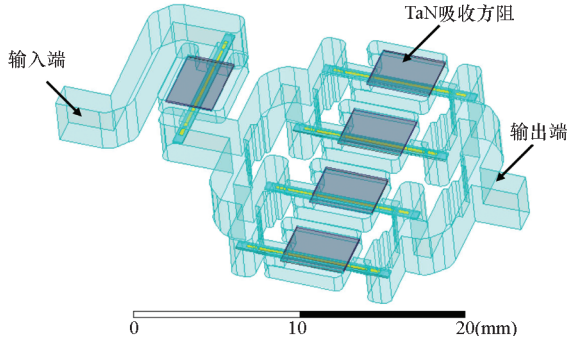
(b) 仿真结果
(b) Simulated result

图 5 耦合系数计算得到的 E 波段滤波器

Fig.5 E-band filter obtained by coupling coefficient calculation

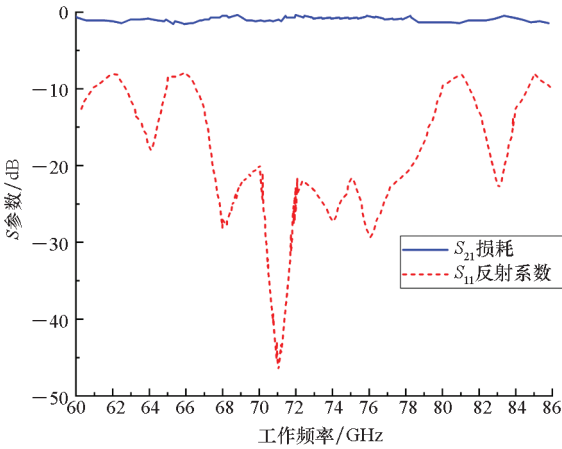
在工作频率范围内产生谐振点,需要对腔体结构的尺寸进行设计,必要时采用吸收方阻 TaN 来抑制谐振点的产生。图 6(a)、图 6(b)展示了由 5 片商用芯片实现的 4 路功率合成 E 波段功率放大器腔体仿真结果,可以看出 E 波段功率合成器无源结构在 68 ~ 78 GHz 频率范围内反射系数小于 -20 dB。由于 E 波段功率合成器采用 5 片功放芯片 4 路合成,功耗较大,因此合成器腔体结构设计时必须做散热处理。图 6(c)显示 E 波段功率合成器最大输出功率接近 300 mW,工作带宽大于 68 ~ 82 GHz。

太赫兹三倍频器电路结构主要分为平衡式电路和非平衡式电路^[11-12],平衡式电路具有基次倍频效率高、带宽宽等优点,但由于平衡式电路结构需要借助电容进行直流偏置,采用混合集成方式实现三倍频电容偏置比较困难,且对装配要求比较高,因此往往只在集成单片电路中才会利用平衡式电路结构实现三倍频器。非平衡式电路则采用常用的二次倍频电路结构实现,电路呈对称结构,电路依靠滤波器结构和减高波导实现二次谐波的抑制以及三次倍频信号的传输。采用谐波平衡仿真方法建立三倍频器等效电路模型和三维结构,如图 7 所示。设计中采用太赫兹平面肖特基二极管的直流电阻为 15 Ω,内电势为 0.93 V,理想因子为 2.4,饱和电流为 8.85 × 10⁻¹³ A,单管零偏置为 16 fF。倍频器电路采用 50 μm 石英基片(ε_r = 3.78)微带电路形式。



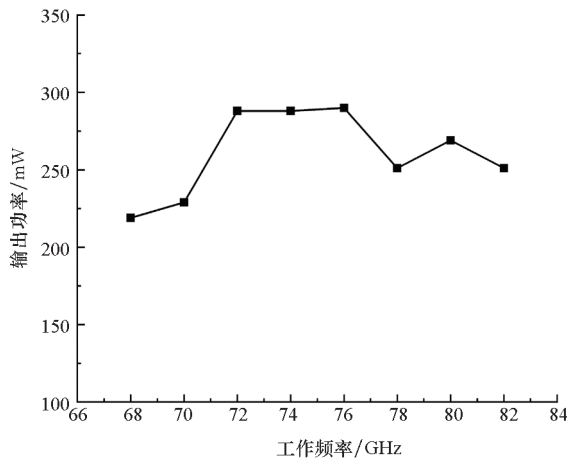
(a) E波段功率合成器无源结构仿真模型

(a) Simulation model of passive structure in E-band power synthesizer



(b) 合成仿真结果

(b) Simulated result of synthesis



(c) 功率测试结果

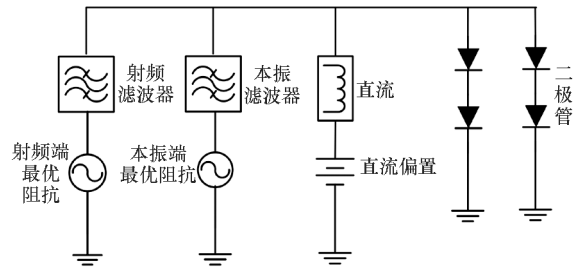
(c) Measured Output power result

图6 E波段4路功率合成器

Fig. 6 E-band 4 channels power combiner

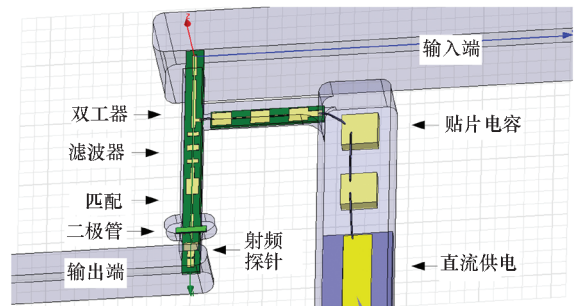
220 GHz 非平衡式三倍频器测试与仿真结果如图8所示,由图8可知,非平衡式三倍频器在219 GHz 频率处最大功率为11 dBm,最大倍频效率大于5%,在214~226 GHz 频率范围内,输出功率大于5 dBm。图9展示了最终的220 GHz 发

射前端的实物图,结构尺寸小于100 mm×40 mm×30 mm,紧凑型的结构布局方便实现太赫兹发射链路的系统小型化集成。



(a) 等效电路模型示意图

(a) Schematic diagram of equivalent circuit model



(b) 三维电磁仿真结构

(b) 3D electromagnetic simulated structure

图7 220 GHz 非平衡式三倍频器的仿真电路结构
Fig. 7 Simulation circuit of 220 GHz unbalanced frequency multiplier

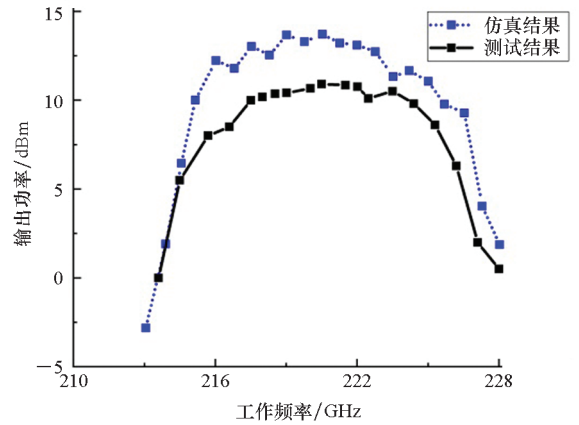


图8 220 GHz 非平衡式三倍频器测试与仿真结果
Fig. 8 Simulated and measured result of 220 GHz unbalanced frequency multiplier

3 220 GHz 接收前端

相对于220 GHz 发射前端来说,220 GHz 接收前端的本振驱动所要求的功率较低(2~5 mW),因此设计前级驱动只要满足带宽和功率要求即可。前级驱动主要包括36 GHz 功率放大器以及108 GHz 三倍频器。108 GHz 阻性平衡式

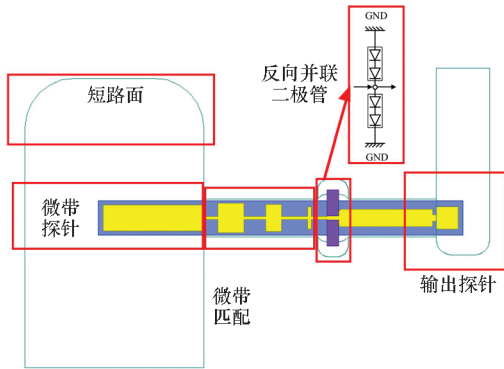


图 9 220 GHz 发射前端实物图

Fig. 9 Physical picture of 220 GHz transmitter structure

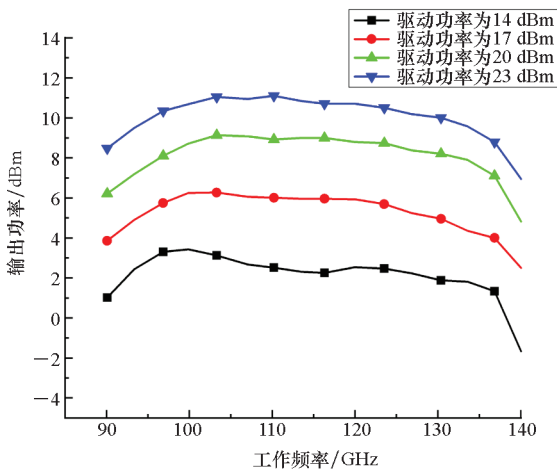
三倍频器采用阻性肖特基二极管 UMS 公司的 DBE105a,通过两个芯片反向并联形成平衡结构,如图 10(a)所示。微带线结构采用宽度为 700 μm ,厚度为 127 μm 的石英基片,相对介电常数为 3.78。最终扫描如图 10(b)所示,108 GHz 平衡式三倍频器在 90 ~ 140 GHz 频率范围内实现了大于 8 dBm 的功率输出,且平坦度为 ± 1.5 dB,很好地满足了接收机对前级驱动功率的要求。

收机的第一级使用,因此其噪声系数是极为重要的性能指标。利用太赫兹肖特基二极管设计太赫兹混频器时,建立精确的太赫兹二极管模型是设计低噪声混频器的前提。为了准确对 220 GHz 固态谐波混频器进行仿真,建立了引入电子热噪声的肖特基二极管完备电气模型,相比简易二极管模型仅有 $I_j(V_j)$ 和 $C_j(V_j)$ 来表征非线性,新的模型中增加了耗尽区电阻 R_{epi} 、惰性电感 L_i 、位移电容 C_d 、趋肤电阻 Z_{skin} 以及欧姆接触电阻 Z_c ,如图 11 所示。二极管的主要性能参数如下:结电容 1.5 fF,串联电阻为 13 Ω ,反向饱和电流为 9.1×10^{-15} A,理想因子为 1.12,势垒电压为 0.69 V。设计太赫兹混频器时,采用紧凑型 hammer-head 滤波器强谐振结构,替代传统的高低阻抗低通滤波器,尽可能在保证抑制度的前提下降低信号传输损耗。220 GHz 太赫兹混频器仿真结构如图 12(a)所示。通过控制中频的增益(0 ~ 60 dB)来实现接收机 60 dB 动态范围指标,如图 12(b)所示。最后通过 Y 因子法^[13]对 220 GHz 接收机噪声系数与混频器噪声温度性能进行测试,测试结果如图 13 所示。220 GHz 接收机测试的最低噪声系数为 6.3 dB,而 220 GHz 混频器在 205 ~ 235 GHz 工作范围内,最低双边带噪声温度为 600 K,220 GHz 接收机的中频范围为 0.3 ~ 1.2 GHz,中频噪声系数为 0.7dB。



(a) 仿真电路结构

(a) Simulated circuit structure



(b) 输出功率扫描结果

(b) Output power scanning results

图 10 110 GHz 阻性平衡式三倍器仿真

Fig. 10 Simulation of 110 GHz resistive balanced tripler

由于太赫兹频段低噪声放大器的缺乏,在设计太赫兹频段的接收机时,太赫兹混频器往往作为接

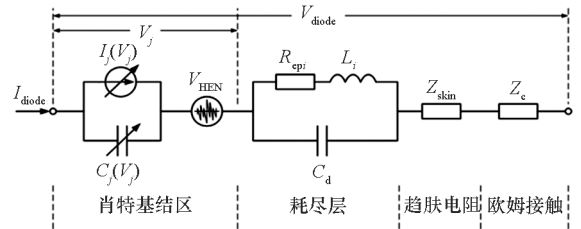
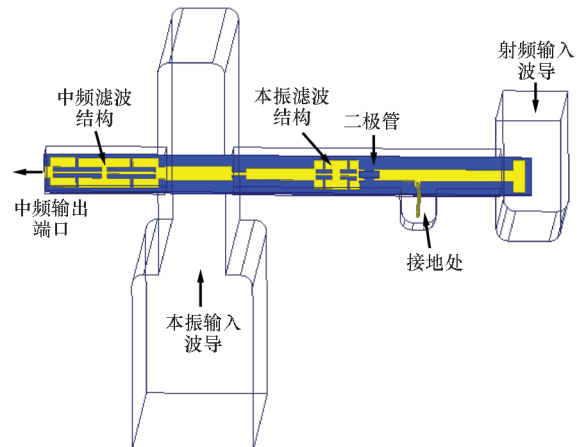


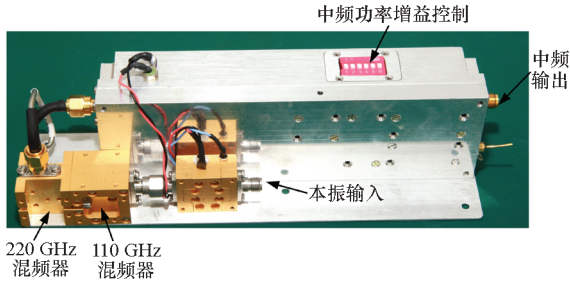
图 11 肖特基二极管结区电气模型

Fig. 11 Schottky diode junction model



(a) 220 GHz 混频器仿真电路结构

(a) Simulated structure of 220 GHz sub-harmonic mixer



(b) 220 GHz 接收机结构

(b) Structure of 220 GHz receiver

图 12 220 GHz 混频器电路结构与接收结构

Fig. 12 Circuit structure of 220 GHz mixer and receiving structure

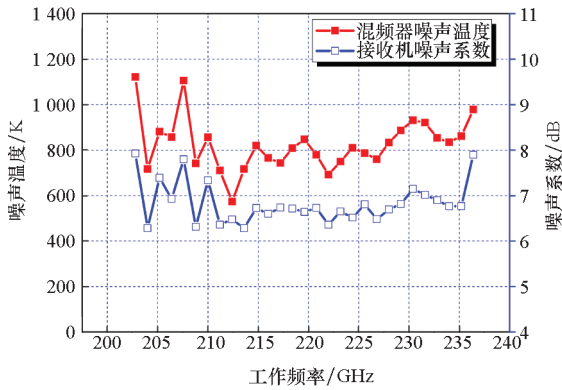


图 13 220 GHz 混频器噪声温度与接收机噪声系数测试(中频为 1 GHz)

Fig. 13 Measured noise temperature of 220GHz mixer and noise figure of receiver ($IF = 1$ GHz)

4 结论

基于肖特基二极管的非线性研制了 210 ~ 220 GHz 的太赫兹发射链路和接收机,发射机输出功率大于 5 dBm,最大输出功率大于 10 dBm,接收机最优噪声系数小于 6.5 dB,增益动态范围大于 60 dB。为了增加发射链路的输出功率和接收机的稳定性,下一步工作将在收发链路中增加 220 GHz 的功率放大器和低噪声放大器。

参考文献 (References)

[1] MEHDI I, SILES J V, LEE C, et al. THz diode technology: status, prospects, and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(6): 990 - 1007.

[2] BRYLLERT T, SVEDIN J A, GANDINI E, et al. 220-GHz imaging radar with 1-Hz frame rate using an array of homodyne transceivers [C]// Proceedings of Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XXI, 2018.

[3] GATILOVA L, MAESTRINI A, TREUTTEL J, et al. Recent progress in the development of French THz Schottky diodes for astrophysics, planetology and atmospheric study [C]// Proceedings of the 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2019.

[4] CHEN Z, MA X, ZHANG B, et al. A survey on terahertz communications [J]. China Communications, 2019, 16(2): 1 - 35.

[5] SILES J V, COOPER K B, LEE C, et al. A new generation of room-temperature frequency-multiplied sources with up to $10 \times$ higher output power in the 160 GHz-1.6 THz range [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(6): 596 - 604.

[6] 何月, 蒋均, 缪丽, 等. Y 波段固态谐波混频器研究 [J]. 微波学报, 2016, 32(5): 15 - 18.
HE Y, JIANG J, MIAO L, et al. Research on Y band solid-state sub-harmonic mixer [J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(5): 15 - 18. (in Chinese)

[7] HENRY M, REA S, BREWSTER N, et al. Design and development of Schottky diode frequency multipliers for the MetOp-SG satellite instruments [C]// Proceedings of the 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2016.

[8] ZHANG B, JI D, FANG D, et al. A Novel 220-GHz GaN diode on-chip tripler with high driven power [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(5): 780 - 783.

[9] YANG F, MENG H F, DUO W B, et al. Terahertz sub-harmonic mixer using discrete Schottky diode for planetary science and remote sensing [J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2017, 38(5): 1 - 8.

[10] WANG C, HE Y, LU B, et al. Robust sub-harmonic mixer at 340 GHz using intrinsic resonances of hammer-head filter and improved diode model [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2017, 38(11): 1397 - 1415.

[11] MAESTRINI A, WARD J S, GILL J J, et al. A540-640-GHz high-efficiency four-anode frequency tripler [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(9): 2835 - 2843.

[12] PORTERFIELD D W. High-efficiency terahertz frequency triplers [C]// Proceedings of IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, 2007: 337 - 340.

[13] TREUTTEL J, GATILOVA L, MAESTRINI A, et al. A520-620-GHz Schottky receiver front-end for planetary science and remote sensing with 1070 K-1500 K DSB noise temperature at room temperature [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016, 6(1): 148 - 155.