面向毫米波亚毫米波基准探测辐射计的毫米波低噪声放大器低温性能表征

吴雨桐[1,2]　朱皓天[1,2]　史 俊[1,2]　何杰颖[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室，北京 100190)
2(中国科学院大学，北京 100049)

摘　要：低噪声放大器（Low Noise Amplifier，LNA）是毫米波辐射计、雷达和通信接收机系统中的关键前端模块。本研究中的毫米波（80~110GHz）LNA 应用于毫米波亚毫米波基准辐射计接收机中，接收机工作温度为 20~80K。由于欧美国家对低温毫米波 LNA 的技术封锁，国内尚缺乏低温工作的毫米波 LNA。为打破这一技术封锁，明确 LNA 最佳低温工作温度，选取了国产常温毫米波 LNA 样品，搭建低温性能测试平台，对其增益和噪声温度进行低温性能表征。实验结果表明，当温度从 300 K 下降至 80 K 时，LNA 增益提高约 3 dB，噪声温度降低约 170 K。由此确定 LNA 的最佳工作温度为 80 K，确定了 LNA 放置于辐射计接收机中的位置和辐射计结构。本研究为国产毫米波 LNA 在毫米波亚毫米波辐射计系统中的应用提供了可行的实验依据。

关键词：毫米波，低噪声放大器，低温表征，噪声温度，增益
中图分类号：O514.2

最新录用

Low Temperature Performance Characterization of Millimeter-Wave Low-Noise Amplifiers for Millimeter- and Submillimeter-Wave Benchmark Detection Radiometers

Wu Yutong[1,2]　Zhu Haotian[1,2]　Shi Jun[1,2]　He Jieying[1,2]

1 (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
2 (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Low-noise amplifiers (LNAs) are key front-end components in millimeter-wave radiometers, radar systems, and communication receivers. Their noise performance directly determines the sensitivity, detection capability, and dynamic range of the overall receiving system. In millimeter-wave and sub-millimeter-wave applications, reducing the equivalent input noise of the receiver is particularly important because the received

基金项目：1. 国家重点研发计划(2023YFB3905603) 2. 国家自然科学基金项目(62171432)
投稿日期：2026. 1. 30
E-mail: wuyutong231@mails.ucas.ac.cn

signals are often extremely weak. Although cryogenic LNAs have been widely studied and applied in some high-sensitivity systems, there is still a lack of experimental characterization and performance evaluation of domestically developed millimeter-wave LNAs under low-temperature operating conditions.To address this issue, this work establishes a cryogenic performance testing platform covering a temperature range from 30 K to 300 K. Based on this platform, the low-temperature characteristics of a domestically manufactured room-temperature millimeter-wave LNA are experimentally investigated. The gain and noise temperature of the LNA are measured and analyzed at different physical temperatures, and the variation trends of the key performance parameters are obtained. The experimental results show that the LNA exhibits significant performance improvement under cryogenic conditions. When the operating temperature decreases from 300 K to 80 K, the gain increases by approximately 3 dB, while the noise temperature decreases by about 170 K. These results indicate that cooling can effectively improve the noise performance of the tested LNA and enhance its applicability in high-sensitivity millimeter-wave receiving systems.Furthermore, considering the influence of the measurement chain, an error cascade model and waveguide attenuation correction are introduced to improve the accuracy of the extracted noise performance. By combining the measured data with the corrected analysis results, the optimal operating temperature of the tested domestic millimeter-wave LNA is determined to be approximately 80 K. Below this temperature, further cooling provides limited additional improvement while increasing system complexity and cryogenic cost.This study provides experimental evidence and parameter references for the application of domestically developed millimeter-wave LNAs in millimeter-wave and sub-millimeter-wave radiometer systems. The results also offer useful guidance for the cryogenic design, performance evaluation, and system-level optimization of future high-sensitivity receiver front ends.

Key words: Millimeter-wave, Low-noise amplifier (LNA), Cryogenic characterization, Noise temperature, Gain

最新录用

0 引言

低噪声放大器（LNA）是毫米波及太赫兹接收机系统前端的关键器件之一[1,2]，由于其具有极低的噪声温度，可以获得很高的信噪比，因此可以极大提高接收机系统的灵敏度[3]。基于这一特性，LNA 在雷达侦察，深空探测，卫星通信等高精度微波测量系统中均具有重要应用[4,5]。常温下接收机前端噪声系数较大，灵敏度通常不高，低温技术应用于接收系统可改善传统常温系统的各项指标，如降低有源器件等效噪声温度，提高器件增益等[6,7]，如曼彻斯特大学在 2017 年研制的一款 70~110 GHz LNA，室温下噪声温度为 227~438 K，在 20 K 下噪声温度为 22~40 K[8]。

在毫米波亚毫米波基准探测辐射计设计中，89、110~115 GHz 接收机系统工作在低温环境下(20~80 K)，毫米波（80~110GHz）LNA 作为接收机前端的关键部件之一[9-11]，对整个系统的噪声起着决定性作用[12,13]。然而，由于欧美国家对低温毫米波（80~110GHz）LNA 技术的长期封锁，国内尚缺乏成熟的低温毫米波（80~110GHz）LNA 产品[14]，为打破这一技术壁垒，本研究选取了国内某研究所研制的多款常温毫米波（80~110GHz）LNA，搭建了两套低温表征系统，分别对毫米波（80~110GHz）LNA 的低温增益和噪声温度特性进行表征[15]，以探索毫米波（80~110GHz）LNA 在低温下的性能变化规律，明确其最佳工作温区，以确

定其在接收机系统冷屏中的位置和辐射计结构。实验搭建的低温表征平台温度可控范围为20~300 K ，低温增益表征系统工作频率覆盖 80~125 GHz，低温噪声温度表征系统工作频率覆盖 80~110 GHz。通过建立不同测试系统的误差修正模型，对测量结果进行校正[6]，获得常温毫米波（80~110GHz）LNA 样品在低温下的增益与噪声温度随温度变化的特性曲线[16,17]。开展国产毫米波（80~110GHz）LNA 的低温性能表征不仅是接收机系统性能优化的必要环节，也是后续噪声优化与设计迭代的重要依据[10]。

本研究旨在系统分析国产毫米波（80~110GHz）LNA 在低温环境下的增益与噪声性能演变规律，明确国产毫米波（80~110GHz）LNA 的最佳工作温区[18]，为后续器件结构优化与性能迭代提供实验依据，预计在经过几轮必要的迭代后实现国产替代。

1 LNA 低温性能表征系统及原理

1.1 低温增益表征

本实验测试了 LNA 样品在 80~125 GHz 频段、60~300 K 温度范围的增益变化曲线，测试系统框图如图 1(a)所示，实验搭建的测试系统实物图如图 1(b)所示。矢量网络分析仪两端连接扩频模块连接到低温杜瓦，杜瓦内部经过 WR-10 波导管连接到待测 LNA，再由 WR-10 波导管连接到杜瓦外。杜瓦可看作为三层结构，最外层为 300 K，中间冷屏为 80 K，最里层冷板为 4 K，杜瓦内部结构图和实物图如图 2(a)和图 2(b)所示。制冷机采用两级脉冲管预冷节流循环方案，温控精度优于±0.1 K，可实现 300~20 K 的连续调节。

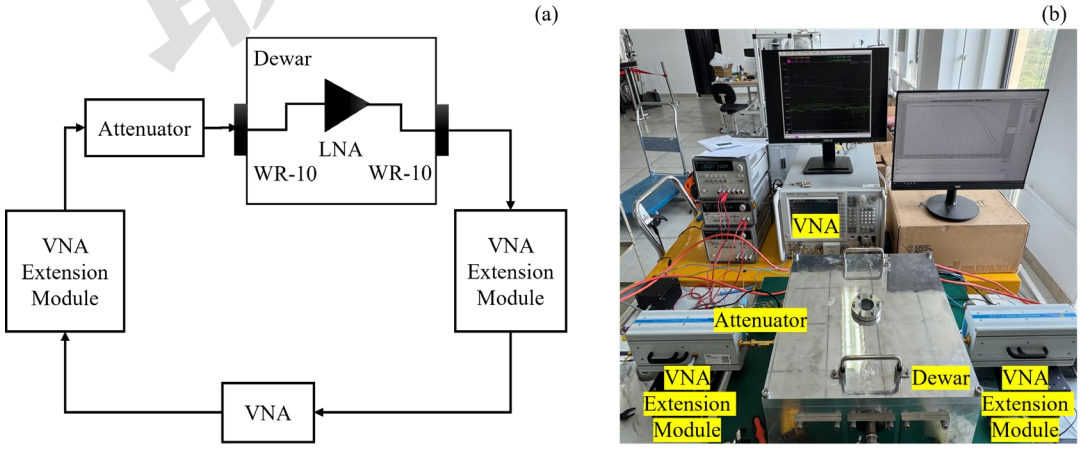


图 1 (a) LNA 低温增益测试方案图 (b)测试系统搭建图

Fig.1 (a) Schematic of LNA Low-Temperature Gain Test Setup (b) Test System Configuration Diagram

最新录用

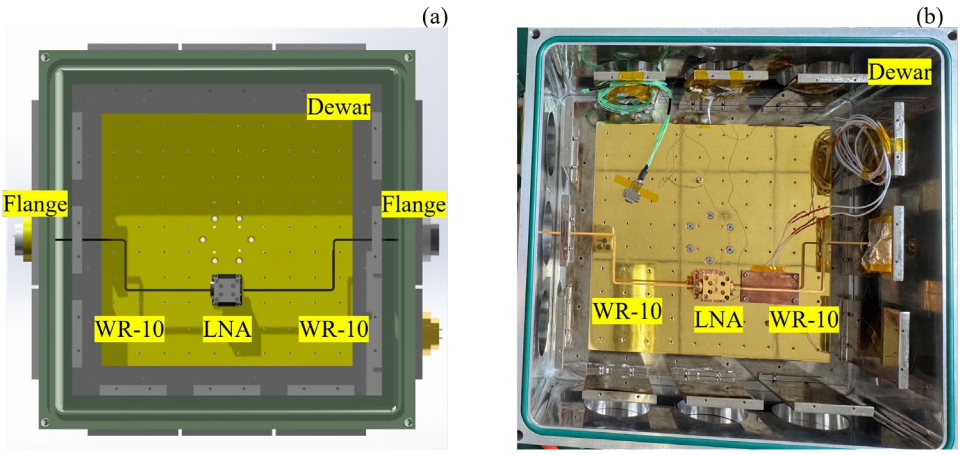


图 2 (a) 杜瓦内部结构图 (b) 杜瓦内部实物图

Fig. 2 (a) Internal structure diagram of the Dewar flask (b) Actual photograph of the Dewar flask interior

实验记录了测量增益时杜瓦内部 LNA 降温曲线，如图 3 所示，在 300~100 K 内大概每隔 8 分钟下降 10 K，之后降温速度逐渐加快，在 20~10 K 时降温速度最快，之后逐渐减慢。实验中温度每下降 10 K 记录一次测量数据，以分析 LNA 增益性能随温度变化特性。

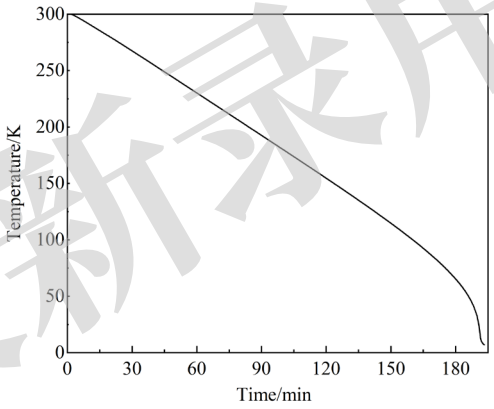


图 3 测试 LNA 增益降温曲线

Fig. 3 Test LNA Gain Temperature Dependence Curve

由于校准只能校准到杜瓦两侧，因此测试的 LNA 增益曲线实际上是杜瓦的整体增益，杜瓦内部的法兰盘、WR-10 等误差无法排除，同时 LNA 封装盒也会引入误差。为了排除掉这些误差，在 80~125 GHz 频段内测试了一组直通放大器的衰减曲线，以获得杜瓦系统自身的衰减特性，直通放大器是指封装盒内部没有电路结构，只有一条微带线连接两个端口的放大器。直通放大器衰减测量结果如图 4 所示，衰减随着温度降低逐渐减小。LNA 的真实增益即为测试的增益减掉直通放大器的衰减：

$$Gain_{LNA} = Gain_{measure} - L_{through} \tag{1}$$

其中，$Gain_{LNA}$为 LNA 真实增益，$Gain_{measure}$为测量的系统总体增益，$L_{through}$为直通放大器的衰减。

最新录用

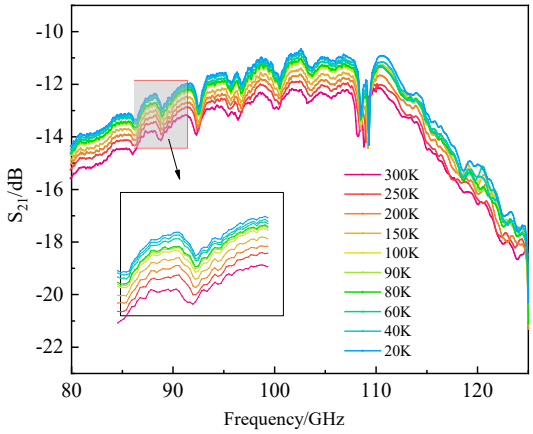


图 4　直通放大器衰减随温度变化曲线

Fig. 4　Temperature-dependent attenuation curve of the direct amplifier

1.2　低温噪声温度表征

本实验通过 Y 因子法测试了 80~110 GHz 频段内 LNA 在 30~300 K 范围内的噪声温度[19]，测试系统框图如图 5(a)所示。噪声源通过隔离器连接到低温杜瓦，杜瓦内部 LNA 经过 WR-10 波导管输出的 RF 信号和信号源经 8 倍频得到的 LO 信号作为输入，经过下变频输出 IF 信号，传输到噪声分析仪中，实验搭建的测试系统实物图如图 5(b)和图 5(c)所示。

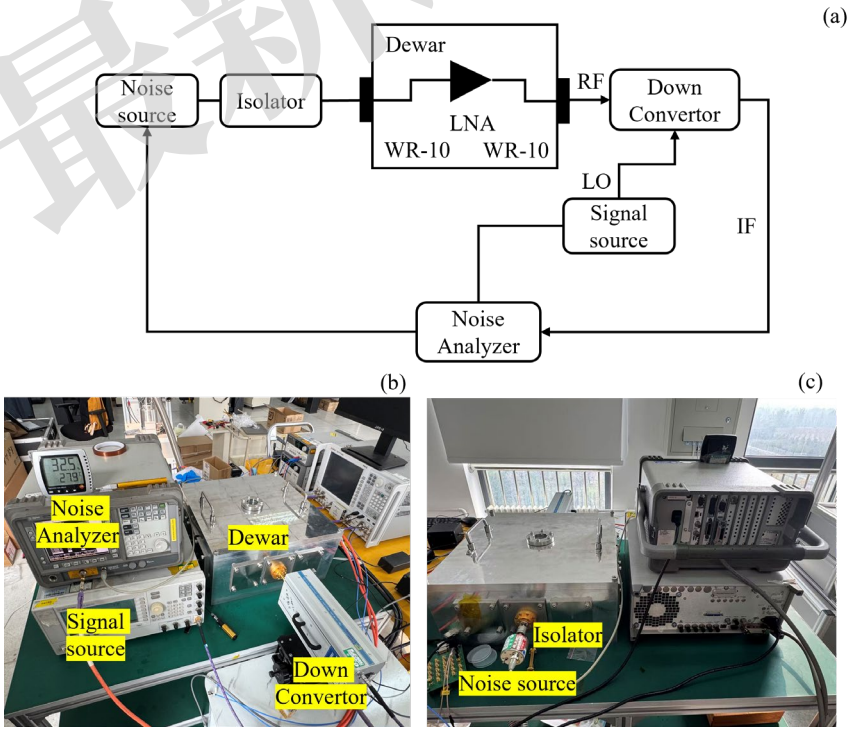


图 5　(a) LNA 低温噪声测试系统测试框图 (b)LNA 低温噪声测试系统搭建正面实物图 (c)LNA 低温噪声测试系统搭建背面实物图

Fig.5 (a) Block diagram of the LNA cryogenic noise test system (b) Front view of the LNA cryogenic noise test system setup (c) Rear view of the LNA cryogenic noise test system setup

Y 因子法测量 LNA 等效噪声温度的工作方程为[15]：

$$Y = \frac{P_{ON}}{P_{OFF}} \tag{2}$$

$$T_e = \frac{T_{hot} - Y\,T_{cold}}{Y - 1} \tag{3}$$

其中P_{ON}和P_{OFF}为输入为热、冷噪声源时放大器的输出功率，T_{hot}和T_{cold}为到待测件输入端冷热噪声源的等效输出噪声温度。

实验记录了测量增益时杜瓦内部 LNA 降温曲线，如图 6 所示，LNA 约在 188 min 时下降到 20 K，实验中 LNA 温度每下降 10 K 记录一次测量数据，以分析 LNA 噪声性能随温度变化特性。

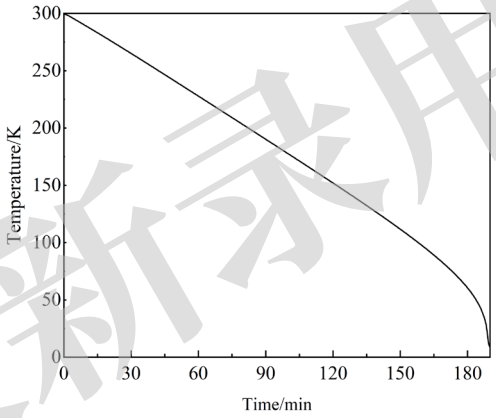


图 6 测试噪声温度时 LNA 温度曲线

Fig.6 LNA Temperature Curve During Noise Temperature Testing

由于校准只能校准到杜瓦两侧，噪声分析仪的测量结果为整个杜瓦的噪声系数，包含了杜瓦两端法兰盘及内部两段 WR-10 波导管的噪声误差，因此需要进行数据后处理，依次排除掉这些误差引起的噪声。噪声温度误差计算模型如图 2(a)所示，基于误差模型建立了噪声温度修正公式：

$$T_e = T_{e1} + L_1 \cdot T_{e2} + L_1 \cdot L_2 \cdot T_{e3} + L_1 \cdot L_2 \cdot \frac{T_{e4}}{G_3} + L_1 \cdot L_2 \cdot L_4 \cdot \frac{T_{e5}}{G_3} \tag{4}$$

其中T_e为测试的系统总噪声温度，T_{e1}和T_{e5}为两端法兰盘的噪声温度，L_1为常温法兰盘衰减，T_{e2}和T_{e4}分别为两段 WR-10 波导管的噪声温度，L_2和L_4为 WR10 波导管衰减，T_{e3}为 LNA 真实噪声温度，G_3为 LNA 增益。

接下来依次对法兰盘和 WR-10 波导管的噪声温度进行表征，以计算出真实的 LNA 噪声温度。

最新录用

(1) 法兰盘噪声温度表征

法兰盘处于常温环境，其等效噪声温度可通过衰减曲线直接计算。通过 VNA 测得法兰盘的衰减可求得等效噪声温度，法兰盘实物图和测试得到的衰减曲线如图 7(a)和图 7(b)所示。经过计算，法兰盘引入的噪声温度约为 20 K，对系统整体影响较小，但在精密测量中仍需扣除。

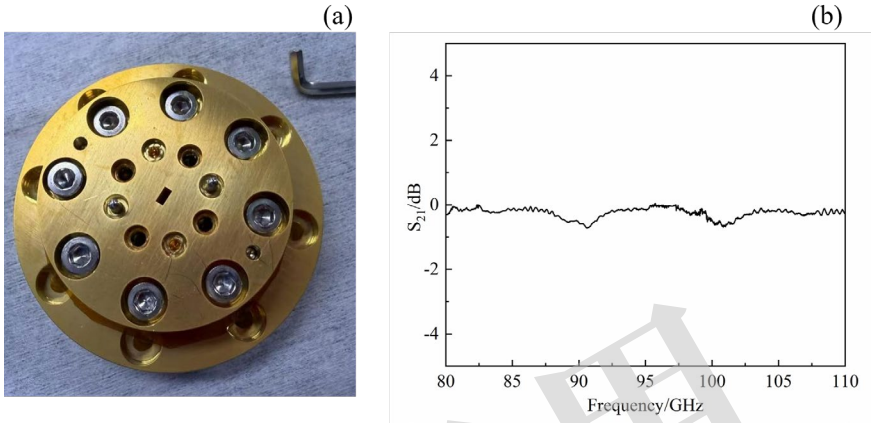


图 7 (a)法兰盘实物图 (b)法兰盘常温衰减曲线

Fig.7 (a) Flange Physical Diagram (b)Flange Decay Curve at Ambient Temperature

(2) WR-10 波导管噪声温度表征

实验测量了 WR-10 波导管在 80~110 GHz 频段内的常温衰减曲线，其实物图和测试得到的衰减曲线如图 8(a)和图 8(b)所示。因考虑杜瓦绝热需求，WR-10 波导管的材料选取为不锈钢，由于不锈钢焊接工艺和波导管内壁镀金工艺加工难度较大，导致波导管损耗较大，因此本实验中的 WR-10 波导管存在较大衰减，其常温衰减为 5~8 dB。

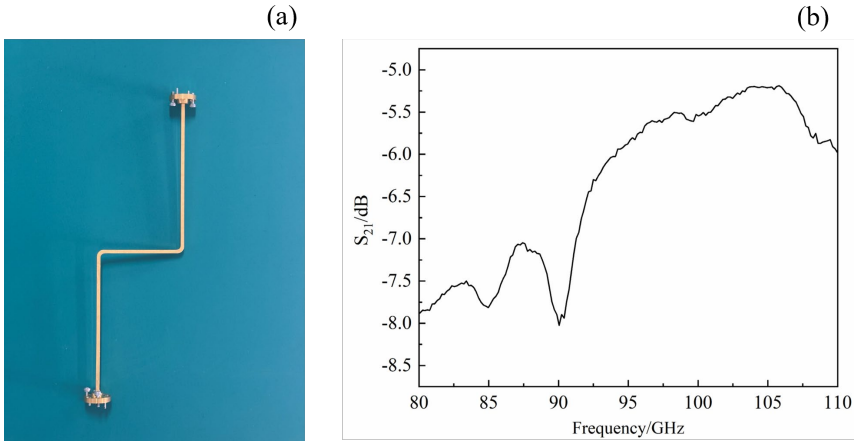


图 8 (a)WR-10 波导管实物图 (b)WR-10 波导管常温衰减曲线

Fig.8 (a) WR-10 Waveguide Physical Diagram (b) WR-10 waveguide attenuation curve at room temperature

由于 WR-10 波导一端连接常温法兰盘，另一端连接低温 LNA，因此其温度沿长度方向

最新录用

呈梯度分布。而波导管的衰减又是温度的函数，其衰减也是随位置变化的，因此表征出 WR-10 波导管的温度和衰减是计算噪声温度的关键。

为了得到 WR-10 波导管温度分布，测试了加工 WR-10 波导管的不锈钢材料样品随温度变化的热导率曲线，如图 9(c)所示，利用 COMSOL 建立三维热传导模型，得到的杜瓦内部温度场分布图如图 9(a)所示。对波导管进行分段仿真，得到温度从 300 K 每降 10 K 时的温度分布曲线。以 80 K 为例，波导管温度从外部约 300 K 连续下降至内部 80 K，其温度场分布如图 9(b)所示，其温度分布曲线如图 9(d)所示，它是将波导管离散为 1224 个等分点组成的，因此整个 WR-10 波导管的噪声温度可等效成 1223 段等分波导管级联，计算各段的微分衰减，通过积分求和得到总噪声温度。

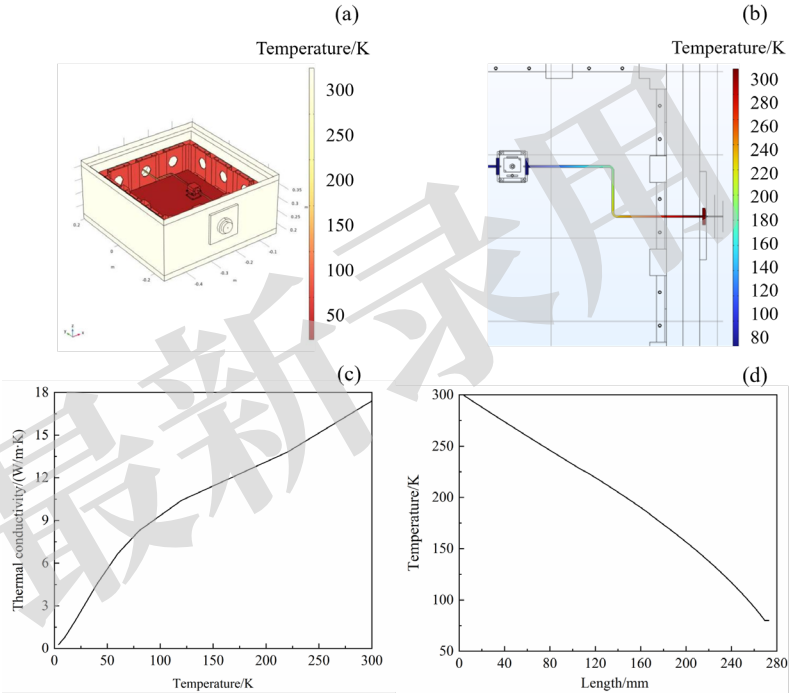


图 9　(a)杜瓦内部温度场分布图 (b)波导管温度从 300 K 连续下降至 80 K 温度场分布图 (c)WR-10 波导管不锈钢材料样品随温度变化热导率曲线 (d)LNA 80K 时对应的 WR-10 波导管温度曲线

Fig.9　(a) Temperature distribution map inside the Dewar flask (b) Temperature distribution map of the waveguide tube as temperature continuously decreases from 300 K to 80 K (c) Thermal conductivity curve of the WR-10 waveguide tube stainless steel material sample as a function of temperature (d) Temperature curve of the WR-10 waveguide tube corresponding to the LNA at 80 K

为获得 WR-10 波导管沿程衰减分布，首先需要求出该波导管在不同温度下的总衰减。基于直通 LNA 测得的总衰减曲线，可按式(4)计算单侧 WR-10 波导管的总衰减量：

$$L_{WR10} = (L_{sum} - 2 \cdot L_{flange} - L_{through})/2 \tag{5}$$

其中，L_{sum}为测试得到的总体衰减，L_{flange}为测试的常温法兰盘衰减，$L_{through}$为直通 LNA 的衰减。

在此基础上，将波导管衰减近似等效为由 N=1223 段微分波导组成、沿程逐级递减的等差衰减序列，其总和满足$\sum_{k=1}^{N} L_k = L_{WR-10}$，据此编写程序生成不同温度下 80~110 GHz 频段对应的衰减序列，并采用微分分段求和思想计算 WR-10 波导管的等效噪声温度：

$$T_e = \sum_{k=1}^{1223} (L_k - 1)\left(\prod_{i=1}^{k-1} L_i\right) T_k \tag{6}$$

其中，L_k为每段微分波导管的衰减，T_k为每段波导管对应的物理温度。

2 结果与分析

2.1 低温增益表征结果

实验中对多款 LNA 样品进行了 60~300 K 范围内的低温增益测试。测量结果表明，随着环境温度降低，LNA 增益整体呈上升趋势，并在约 80 K 附近达到峰值；当温度继续降低，增益反而下降，表明器件在极低温环境下可能因有源器件参数漂移、匹配状态变化等因素导致放大性能逐步退化。综合对比多款 LNA 样品测试结果，本文选取性能相对更优的 2 号与 85 号 LNA 作为代表进行重点分析。

测试得到 2 号 LNA 在 80~110 GHz 频段，温度从 290 K 下降至 60 K 的增益变化曲线如图 10(a)所示，可以看到在温度下降至 80 K 之前，80~125 GHz 频段内的增益随温度降低普遍逐步提升，在 80 K 附近增益最大，比 290 K 时提高 2~4 dB，当温度继续降低至 60 K 时增益反而明显下降，比 290 K 时降低 1~2 dB，说明温度低于 60 K 时 LNA 增益性能急剧恶化。

85 号 LNA 在 80~125 GHz、300~60 K 的增益变化趋势与 2 号 LNA 类似，如图 10(b)所示。可以看到在温度下降至 80 K 之前，80~125 GHz 频段内的增益随温度降低普遍逐步提升，在 80 K 时增益取得峰值，比常温提高 2~4 dB，当温度继续降低至 60 K 时增益反而下降，比 80 K 时降低 0.5 dB 左右。

最新录用

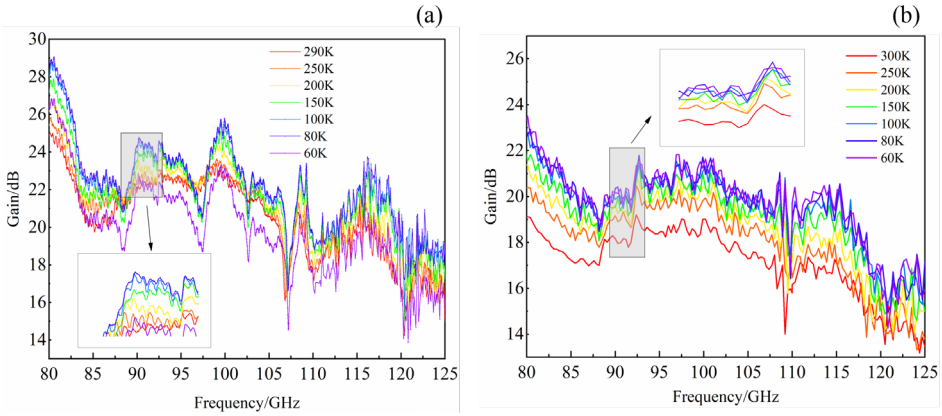


图 10 (a)2 号 LNA 290~60K 增益曲线 (b)85 号 LNA 290~60 K 增益曲线

Fig.10 (a)Gain Curve of LNA No. 2 (290~60 K) (b) Gain Curve of Model 85 LNA (290~60K)

实验记录了 2 号和 85 号 LNA 电流随温度变化曲线，如图 11(a)所示。随着温度降低，2 号和 85 号 LNA 电流均逐渐减小，从 290 K 下降到 60 K，2 号 LNA 电流从 33 mA 下降到 28 mA，85 号 LNA 电流从 50 mA 下降到 48 mA。

考虑到毫米波亚毫米波基准辐射计系统射频中心频率之一为 89 GHz，因此选取了 2 号和 85 号 LNA 在 89 GHz 频点处的不同温度增益进行定量比较，其结果如图 11(b)所示，可以看到 2 号和 85 号 LNA 均在 80 K 时增益最大，2 号 LNA 在 80 K 时增益为 23.17 dB，相较于常温提升 1.53 dB 左右，温度下降至 60 K 时增益显著降低至 21.09 dB，85 号 LNA 在 80 K 时增益为 20.15 dB，相较于常温提升 1.89 dB 左右，温度下降至 60 K 时增益显著降低至 19.7 dB。根据以上分析结果可以初步判断国产化毫米波（80~110GHz）LNA 的最佳工作温度为 80 K。

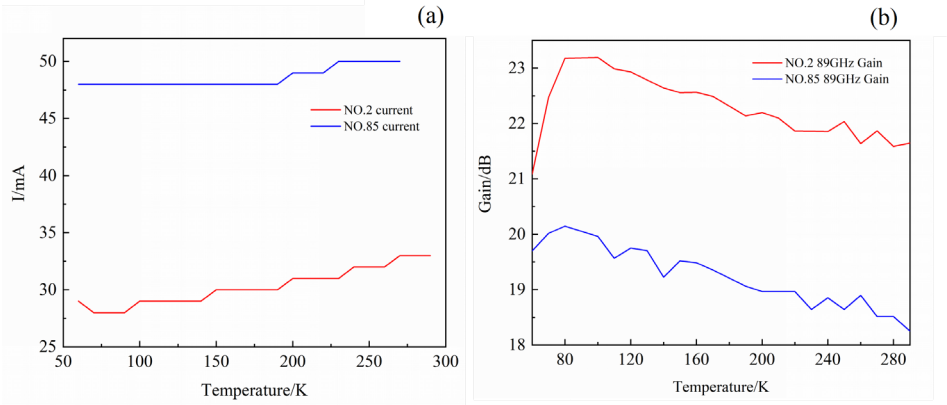


图 11 (a)2 号和 85 号 LNA 电流随温度变化曲线 (b)89GHz 处 2 号和 85 号 LNA 增益随温度变化曲线

Fig.11 (a)Temperature-dependent current curves for LNA No. 2 and No. 85 (b)Temperature-dependent gain curve of LNA No. 2 and NO.85 at 89 GHz

2.2 低温噪声温度表征结果

实验中对 85 号 LNA 进行了低温噪声温度测试。通过对杜瓦两端法兰盘及 WR-10 波导管等引入的系统误差进行修正后，获得了其在 80~110 GHz 频段、30~300 K 温度区间内的T_e变化曲线，如图 13(a)所示。测量结果表明，随着温度降低，T_e先整体呈下降趋势，当温度低于 80 K 后，T_e下降趋于平缓，温度从 80 K 下降至 60 K，T_e仅下降 10 K 左右，说明此时降温获得的噪声温度收益不大，在 80 K 时T_e相比于常温下降约 170 K；温度进一步降低至 40 K 以下时，T_e反而上升，表明在极低温条件下 LNA 噪声性能开始退化。

85 号 LNA 300 K 与 80 K 时的噪声温度之差曲线如图 13(b)所示，由图可知 85 号 LNA 在 80~110 GHz 频段、80 K 时的T_e比常温时平均降低 150 K 左右，可见低温下 LNA 的噪声性能可以得到极大改善。

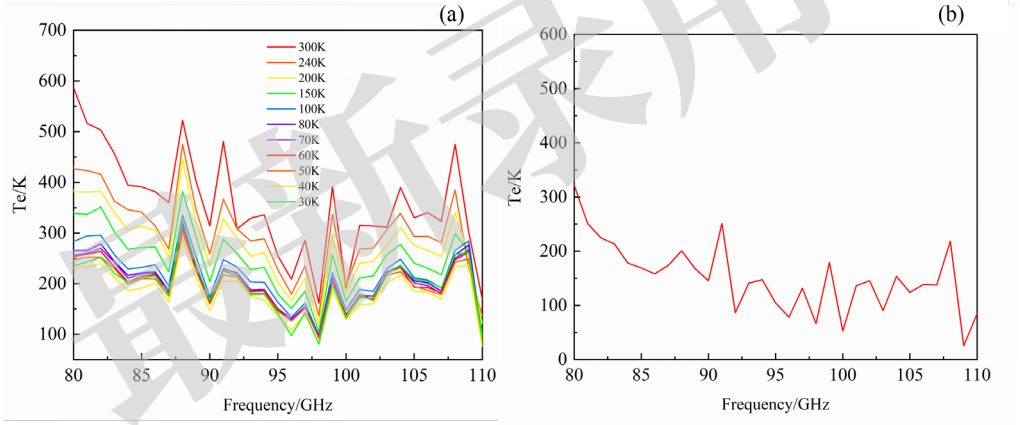


图 12 (a)85 号 LNA 300~30K 噪声温度曲线 (b)85 号 LNA 300K 与 80K 噪声温度之差曲线

Fig.12 (a)Noise Temperature Curve for LNA No. 85 at 300 to 30K (b)Noise Temperature Difference Curve for LNA 85 at 300K and 80K

为进一步定量分析关键频点处的性能变化，选取了毫米波亚毫米波基准辐射计系统射频中心频率 89 GHz 与 107 GHz 两个代表性频点，其对应的 85 号 LNA 增益与噪声温度随温度变化曲线如图 14 所示。测试结果表明，当温度下降至 80 K 之前，增益整体呈上升趋势，噪声温度整体呈下降趋势；当温度继续下降至 80 K 以下，增益性能出现恶化，噪声温度降低逐渐趋于平缓，温度从 80K 降低到 60K，89GHz 处噪声温度仅降低 8K 左右，107GHz 处噪声温度仅降低 5K 左右，可见当温度降低至 80K 以下，降温带来的噪声温度收益很小。当温度降低至 40 K 以下时，噪声温度性能也逐渐出现恶化。由此可以判断国产毫米波（80~110GHz） LNA 的最佳工作温度为 80 K。

最新录用

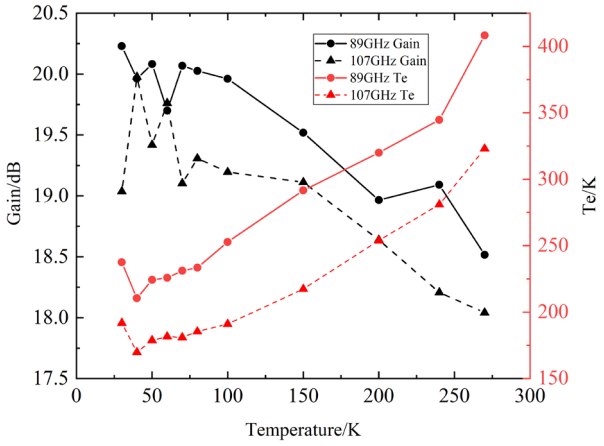


图 13　89 号 LNA 在 89 GHz 与 107 GHz 处增益及噪声温度变化曲线

Fig.13　Gain and Noise Temperature Variation Curves of LNA No. 89 at 89 GHz and 107 GHz

2.3　误差分析

由于 WR-10 波导管在低温下的温度和衰减沿长度方向呈变化分布，具体数值无法通过测量得到，只能通过仿真计算拟合出温度和衰减沿程变化曲线，因此 WR-10 波导管噪声温度表征存在误差，通过级联网络会对 LNA 实际噪声温度结果造成误差。为明确误差范围，选取 LNA 温度在 80 K 时、100 GHz 处频点，计算了当 WR-10 波导管常温衰减由 6 dB 减小到 0.5 dB 时，对 LNA 噪声温度计算结果造成的误差。WR-10 波导管噪声温度$T_{e\,WR-10}$不确定度范围为：

$$\sum_{k=1}^{1223}(L_k-1)\left(\prod_{i=1}^{k-1}L_i\right)\times 80 \le T_{e\,WR-10} \le \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{1223}(L_k-1)\left(\prod_{i=1}^{k-1}L_i\right)\times 300 \tag{7}$$

其中L_k为将 WR-10 波导管等分成 1223 段衰减量依次递减的波导管所对应的每段波导管衰减，$T_{e\,WR-10}$等效为 1223 段等分波导管级联的噪声温度。

根据公式(4)的级联网络误差模型，计算得到的 LNA 噪声温度$T_{e\,LNA}$不确定度范围为：

$$\frac{T_e-T_{e1}}{L_1\cdot L_2}-\frac{\sum_{k=1}^{1223}(L_k-1)\left(\prod_{i=1}^{k-1}L_i\right)\times 300}{2L_2}-\frac{\sum_{k=1}^{1223}(L_{1224-k}-1)\left(\prod_{i=1}^{k-1}L_{1224-i}\right)\times 300}{2G_3}-\frac{L_4\cdot T_{e5}}{G_3} \le T_{e\,LNA} \le \frac{T_e-T_{e1}}{L_1\cdot L_2}-\frac{\sum_{k=1}^{1223}(L_k-1)\left(\prod_{i=1}^{k-1}L_i\right)\times 80}{L_2}-\frac{\sum_{k=1}^{1223}(L_{1224-k}-1)\left(\prod_{i=1}^{k-1}L_{1224-i}\right)\times 80}{G_3}-\frac{L_4\cdot T_{e5}}{G_3} \tag{8}$$

其中，T_e为 80 K 时测量得到的总噪声温度，T_{e1}和T_{e5}为常温法兰盘 100 GHz 处噪声温度，L_1为常温法兰盘 100 GHz 处衰减，L_2和L_4为 WR-10 波导管衰减，G_3为 LNA 在 80 K、100 GHz 处增益。

计算得到的噪声温度不确定度 $u(T_e)$随 WR-10 波导管常温衰减L_{WR-10}变化曲线如图 14

所示。当 WR-10 波导管常温衰减为 6 dB 时，LNA 噪声温度不确定度为±26.9934 K，当 WR-10 波导管常温衰减减小到 0.5 dB 时，LNA 噪声温度不确定度可以减小到±3.83835 K。目前由于不锈钢波导管加工难度较大，常温衰减为 5~8 dB，引入的噪声温度较大，导致 LNA 噪声温度不确定度在±30 K 左右，后续工作将改进 WR-10 波导管加工工艺，以减小 WR-10 波导管衰减和引入的噪声温度不确定度，提高 LNA 噪声温度测量精度。

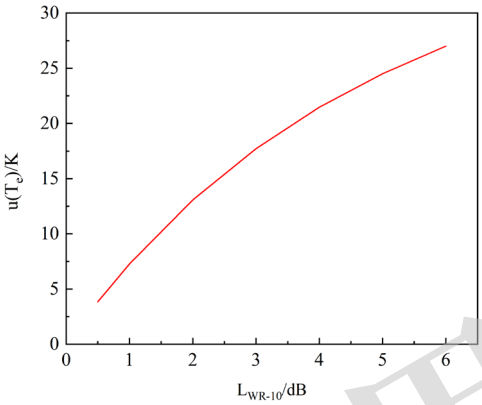


图 14　80K、100GHz 处，不同常温衰减 WR-10 波导管带来的 LNA 噪声温度不确定度曲线

Fig.14　LNA noise temperature uncertainty curves at 80K and 100GHz for WR-10 waveguide tubes with different room-temperature attenuation

最新录用

3　结论

本研究系统地表征了国产毫米波（80~110GHz）LNA 在 30~300 K 温度范围内的增益与噪声性能，明确了其低温下的性能演变规律。实验结果显示，在增益方面，随着温度降低，LNA 增益先逐步提升，并在约 80 K 时达到峰值，增益相较常温提升 3~4 dB；温度低于 80 K 后增益性能出现退化，表明过低温度将导致 LNA 增益性能恶化。在噪声温度方面，毫米波（80~110GHz）LNA 噪声温度在温度下降至 80 K 之前显著下降，低于 80 K 后趋于平稳，在 80 K 时噪声温度相比常温下降约 170 K，温度从 80K 降低至 40K 带来的噪声温度收益很小，温度降低至 40 K 以下时噪声温度反而略有升高。综合分析实验结果，确定国产毫米波（80~110GHz）LNA 在 20~300 K 均可工作，最佳工作温度为 80 K 左右，由此确定了毫米波（80~110GHz）LNA 放置在辐射计接收机 80K 冷屏上，进而确定了辐射计结构。本研究为突破欧美国家对低温毫米波（80~110GHz）LNA 的技术封锁，填补我国低温毫米波（80~110GHz）LNA 产品的空白，推动我国低温毫米波前端器件的发展具有重要意义，为国产化毫米波（80~110GHz）LNA 在低温毫米波亚毫米波辐射计系统中的应用提供了实验依据。

参考文献

[1] MAO Yi. Research on the calibration technology of cryogenic noise source's equivalent output noise temperature[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, **38**(7): 117-121 (毛怡. 低温噪声源等效噪声温度定标技术的研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, **38**(7): 117-121)

[2] HUANG R Y, SU Y C, CHANG H Y. Design of a six-stage W-band low-noise amplifier using a 90-nm CMOS technology[C]// 2024 IEEE 24th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF). San Antonio: IEEE, 2024: 106-109

[3] WANG Yinghao. Design and Implementation of Cryogenic Low Noise Amplifier[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2015 (王英豪. 低温低噪声放大器的设计与实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015)

[4] THOME F, SCHÄFER F, TÜRK S, *et al*. A 67-116-GHz cryogenic low-noise amplifier in a 50-nm InGaAs metamorphic HEMT technology[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2022, **32**(5): 430-433

[5] OUYANG L W, MAYEDA J C, SWEENEY C, *et al*. A broadband millimeter-wave 5G low noise amplifier design in 22 nm fully depleted silicon-on-insulator (FD-SOI) CMOS[J]. *Applied Sciences*, 2024, **14**(7): 3080

[6] XU Jianjun, CHEN Songlin. A noise test-system for cryogenic low noise amplifiers[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(3): 310-314 (徐建军, 陈松麟. 低温低噪声放大器噪声测试系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(3): 310-314)

[7] YAN Zhuoying. Radio Astronomy Receiver Low Noise Amplifier and Shutdown System Calibration Technology Research[D]. Nanning: Guangxi University, 2025 (言卓瑛. 射电天文接收机低噪声放大器和系统定标关键技术的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2025)

[8] CUADRADO-CALLE D, GEORGE D, FULLER G A, *et al*. Broadband MMIC LNAs for ALMA band 2+3 with noise temperature below 28 K[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, **65**(5): 1589-1597

[9] NAJMUSSADAT M. Design and Characterization of Integrated Millimeter-Wave Radio Front-End Circuits for High-Speed Wireless Communication and Radiometric Receivers[D]. Helsinki: Aalto University, 2025

[10] SINGH S P. Radio Receiver Front-End ICs at the Sub-THz/THz Frequency Range in Silicon Technology[D]. Oulu: University of Oulu, 2024

[11] BHUIYAN M A S, HOSSAIN M R, HEMEL M S K, *et al*. CMOS low noise amplifier design trends towards millimeter-wave IoT sensors[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2024, **15**(2): 102368

[12] ROSHI D A, PERILLAT P, FERNANDEZ F, *et al*. A cryogenic wideband (2.5-14 GHz) receiver system for the Arecibo observatory 12 m telescope[J]. *Radio Science*, 2024, **59**(3): e2023RS007839

[13] WANG H H, CHEN M Z. Cryogenic MMIC low-noise amplifiers for radio telescope applications[J]. *Electronics*, 2025, **14**(8): 1572

[14] LONGHI P E, PACE L, COLANGELI S, *et al*. Technologies, design, and applications of low-noise amplifiers at millimetre-wave: state-of-the-art and perspectives[J]. *Electronics*, 2019, **8**(11): 1222

[15] WENGLER M J, WOODY D P, MILLER R E, *et al*. A low noise receiver for millimeter and submillimeter wavelengths[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1985, **6**(8): 697-706

[16] PATEL S S, GUPTA S, GHODGAONKAR D. Ku-band low noise multistage amplifier MIC design having performance comparable to MMIC[C]// 2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). Delhi: IEEE, 2014: 501-506

[17] JIN J D, LIU J, LIU D, *et al*. The noise temperature analysis on a space-grade cryogenic low noise amplifier using two measurement methods[J]. *Radio Science*, 2025, **60**(1): e2024RS008023

[18] GUZZETTI M, ZHANG D, GOODMAN C, *et al*. Improved receiver noise calibration for ADMX axion search: 4.54 to 5.41 μeV[J]. *Physical Review D,* 2025, **111**(9): 092012

最新录用

作者简介：



吴雨桐 女，2001 年 6 月出生于辽宁省辽阳市，研究生就读于中国科学院国家空间科学中心，主要研究方向为面向制冷型星载太赫兹辐射计的关键器件研究。
电子邮件：wuyutong231@mails.ucas.ac.cn



朱皓天 男，1989 年 10 月出生于江苏省南京市，现为中国科学院国家空间科学中心研究员，博士生导师，主要研究方向为太赫兹科学与技术，从事太赫兹星载辐射计系统及其关键技术研究。
电子邮件： zhuhaotian@nssc.ac.cn

最新录用