

## C波段有源微波冷噪声源设计及其性能分析

董 帅<sup>1,2</sup>, 王振占<sup>1</sup>, 李 彬<sup>1</sup>, 陆 浩<sup>1</sup>, 贺秋瑞<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 北京无线电测量研究所, 北京 100854;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 本文在介绍国内外有源微波冷噪声源技术发展的基础上, 分析了有源微波冷噪声源的工作原理和关键技术. 提出了一种有源微波冷噪声源设计方法, 重点分析了设计过程中的关键环节对噪声源性能产生的影响. 采用 pHEMT 型场效应管研制了 C 波段有源微波冷噪声源器件, 并对该器件的性能进行了测试和分析.

**关键词:** 有源微波冷噪声源; 辐射计; 定标; HEMT

**中图分类号:** TN710.2, TP732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)11-2797-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.11.030

## Design and Characterization of C-Band Active Cold Noise Source

DONG Shuai<sup>1,2</sup>, WANG Zhen-zhan<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, LU Hao<sup>1</sup>, HE Qiu-rui<sup>1,3</sup>

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Beijing Radio Institute of Measurement, Beijing 100854, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The active microwave cold noise source technology is introduced. The working principle and key technology of active microwave cold noise source are explained. A design method of active microwave cold noise source is proposed, and the influence of the key steps in the design process on the performance of the noise source is analyzed. Based on these theories, the C band active microwave cold noise source device was developed by the pHEMT type field effect transistor. In the end, the performance of the device is tested and analyzed.

**Key words:** active cold noise source; radiometer; calibration; HEMT

### 1 引言

微波辐射计是一种被动式微波遥感器, 在气象探测、海洋监测以及地表信息获取等领域中有重要作用. 微波辐射计定标用于确定通道响应函数, 建立辐射计输出电压信号与天线观测亮温之间的函数关系, 对微波辐射计测量精度有极为重要的影响<sup>[1]</sup>. 通常, 辐射计被设计线性系统, 可采用两个微波辐射特性精确已知的高低温度定标源进行两点定标, 由辐射计测量原理可知, 高、低温定标源亮温间隔越大, 两者的不确定度引起的定标误差就会越小<sup>[2]</sup>. 因此, 选取高温定标源应尽量接近或者超出观测场景辐射最大值, 低温定标源应尽量接近或者低于其最小值, 二者应尽可能涵盖观测场景亮温的动态范围.

科学实践中, 高温定标源较易获得, 恒温于 300K 附近的匹配负载或人工黑体均可制成高精度高温定标

源, 而低温定标源的获取则是难题. 传统的辐射计人造低温定标源为液氮制冷源<sup>[3,4]</sup>, 其不足在于, 液氮储存隔热装置增大了系统体积和质量, 定期的液氮加注步骤增加了时间成本和维护难度, 因而此类定标源用于实验室场合尚可, 在各类野外探测环境下则难以应用.

为解决上述问题, 本文在微波冷噪声理论的基础上, 研究了一种有源微波冷噪声源器件. 该器件是一种固态微波电路, 能够在常温环境下输出极低的噪声亮温, 摆脱了传统辐射计低温源对制冷剂的依赖, 是一种理想的微波辐射计内定标低温源.

### 2 有源微波冷噪声源概念

有源微波冷噪声源的研究源于对场效应管 (Field Effect Transistor, FET) 噪声特性的分析. 1975 年 Pucel 给出了精确描述 FET 电学特性的等效电路模型<sup>[5]</sup>, 据此,

FET 的等效输入阻抗表现为一个较大的电容(起主要贡献)和一个很小的串联电阻(贡献很小). 根据这种输入阻抗的形式,若在源极电路中加入恰当的电感反馈,则可以在栅极端获得一个无噪电阻器.

在此基础上,1981 年 Frater 等人提出 FET 输入端经过阻抗变换能够得到远小于室温电阻的等效噪声温度,并设想了一种在常温环境下产生低温噪声的噪声源器件——“冷场效应管”(“COLFET”),文献[6]提出其三点潜在应用价值:为低噪声接收机噪声测量提供传统冷负载;作为三端环形器的冷终端以降低天线失配;作为微波辐射计的冷参考负载与天线测得的低温亮温进行比对[6].

其后十六年,Dunleavy 等人首次应用双端口微波网络噪声模型分析和设计了 COLFET,极大推动了 FET 冷噪声源的发展. 进入 21 世纪,国外该方向研究日趋深入,多家研究机构相继研制出应用于不同微波频段的该类噪声源,并将命名统一为“Active Cold Noise Source”(ACNS)或“Active Cold Load, ACL”(ACL). 本文以“有源微波冷噪声源”作为此类器件的中文名称,对应选取“ACNS”作为其英文缩写.

与如 Frater 设想的一样,ACNS 从诞生之时就表现出作为微波辐射计定标源的巨大潜力. ACNS 工作时无需液态制冷剂参与,这大大降低了系统复杂度和维护难度. 而且,作为人噪噪声源,其噪声特性完全人工可控,使得内定标过程不受大气环境变化影响,可用于地基、星载等各种条件,文献[6~17]代表了迄今为止国外在该领域的主要研究成果. 相比于国外研究的高速发展和日臻成熟,目前国内对这一领域的研究相对较少,目前仅有华中科技大学的李青侠老师等人对这一技术进行了研究[18].

### 3 微波冷噪声原理

ACNS 产生的微波冷噪声基于 FET 本征特性和双端口微波网络噪声模型. 图 1 为以场效应管为核心的双端口微波网络示意图.

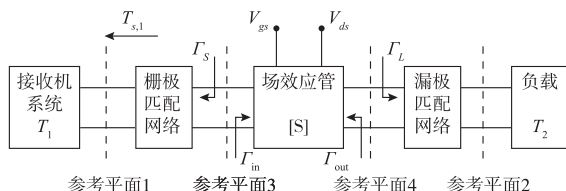


图1 以场效应管为核心的双端口微波网络示意图

根据改进的微波网络噪声模型,参考平面 1 处向系统方向入射的噪声温度为[19]:

$$T_{s,1} = T_b + [(T_1(1 - |\Gamma_s|^2) + T_a) G_{21} |\Gamma_L|^2 + T_2(1 - |\Gamma_L|^2)] G_{12} \quad [K] \quad (1)$$

其中, $T_2$  为负载温度, $T_1$  是与晶体管输入端相连的系统的温度. $G_{12}$  和  $G_{21}$  是由晶体管  $S$  参数计算得到的正向(自栅极向漏极)和反向(自漏极向栅极)功率增益. 而  $T_a$ 、 $T_b$  则是由于非最佳噪声匹配情况导致的漏极噪声传导至栅极的噪声贡献和栅极自身噪声贡献,分别由下式表示[19]:

$$T_a = T_{e(\min)} + \frac{T_k |\Gamma'_{opt}|^2}{1 - |\Gamma'_{opt}|^2} \quad [K] \quad (2)$$

$$T_b = \frac{T_k}{1 - |\Gamma'_{opt}|^2} - T_{e(\min)} \quad [K] \quad (3)$$

其中, $T_{e(\min)} = T_0(NF_{\min} - 1)$ ,  $T_k = 4T_0R_nG_{opt}$ .  $R_n$  和  $G_{opt}$  分别为晶体管的等效噪声电阻和最佳噪声电导, $\Gamma'_{opt}$  为非最佳噪声匹配状态下的实际值,其与  $\Gamma_{opt}$  的关系为:

$$\Gamma'_{opt} = \frac{\Gamma_{in}^* - \Gamma_{opt}}{\Gamma_{opt} \Gamma_{in} - 1} \quad (4)$$

在工程应用中,匹配电路的设计均要求场效应管处于最佳噪声状态,此时  $\Gamma_{in}^* = \Gamma_{opt}$ ,从而有  $\Gamma'_{opt} = 0$ . 在此条件下简化  $T_a$ 、 $T_b$  并代入式(1)中,可以得到新的  $T_{s,1}$  表达式,新表达式对  $|\Gamma_L|$  求偏导得式(5):

$$\frac{\partial T_{s,1}}{\partial |\Gamma_L|} = 2G_{12} [(T_1(1 - |\Gamma_s|^2) + T_{e(\min)}) G_{21} - T_2] |\Gamma_L| \quad (5)$$

由式(5)可以看出,当  $|\Gamma_L| \rightarrow 0$  时,有  $\frac{\partial T_{s,1}}{\partial |\Gamma_L|} \rightarrow 0$ ,此时  $T_{s,1}$  取得极值即最小值. 在此条件下,这种以场效应管为核心的微波电路可以向外输出最低的噪声温度.

同时根据双端口微波网络噪声理论,在最佳噪声匹配的条件下有[19]:

$$\Gamma_L = \frac{\Gamma_{opt}^* - S_{11}}{S_{12}S_{21} + S_{22}(\Gamma_{opt}^* - S_{11})} \quad (6)$$

则  $|\Gamma_L|$  是一个可以通过 FET 本征参数和电路  $S$  参数矩阵直接求得的物理量. 应当注意的是,公式(6)里的  $S$  参数为以参考平面 3 和参考平面 4 作为网络端口时的物理量. 由式(6),设计目标转化为调节参考平面 3/4 间的  $S$  参数矩阵使得  $|\Gamma_L|$  最小.

综合上述理论分析,该微波网络存在  $T_{s,1}$  的最小值,而这一最小值在  $|\Gamma_L|$  最小时达到,这就为实际的 ACNS 研制提供了理论依据.

### 4 C 波段 ACNS 设计

以上述微波冷噪声原理为基础,文本设计了一个工作于 C 波段的 ACNS 器件. 图 2 是 C 波段 ACNS 核心电路拓扑结构.

设计该 ACNS 工作中心频率为 6.8GHz,带宽大于 35MHz,输出噪声温度小于 150K. ACNS 能够在常温环境产生低温噪声归因于 FET 独特的噪声特性,本设计选取 Avago 公司的 ATF38143 型 GaAs 基 pHEMT 管,该

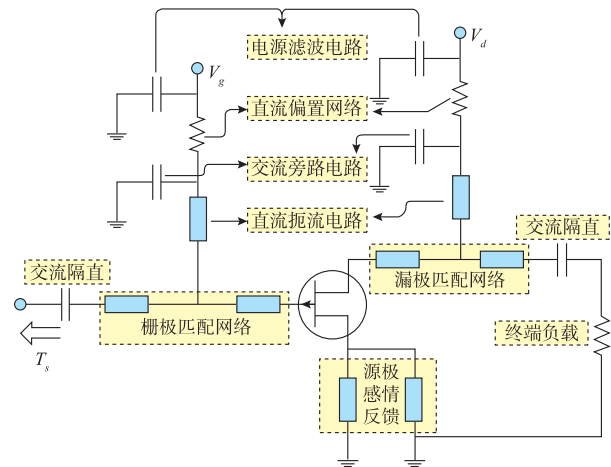


图2 C波段ACNS核心电路结构图

管性能指标如表 1 所示。

表 1 ATF38143 性能指标

符号	参数	单位	最大值
$V_{DS}$	漏源电压	V	6
$V_{GS}$	栅源电压	V	-4
$V_{GD}$	栅漏电压	V	-4
$I_{DS}$	漏极电流	mA	$I_{dss}$
$P_{in}$	射频输入功率	dBm	17
$T_{CH}$	通道温度	°C	160
$T_{STC}$	存储温度	°C	-65 ~ 160

根据之前的分析,我们得以通过最小化 $|\Gamma_L|$ 来实现在最佳噪声匹配和输入功率匹配条件下的 $T_{s,1}$ 最小化。在此状态下,晶体管输入反射系数有 $\Gamma_{in} = S_{11}$ 。当 $\Gamma_L = 0$ ,输入功率匹配条件使得 $\Gamma_{opt} = S_{11}^*$ 。这可以通过改变装置的 $S$ 参数得到。本次设计选取 $V_{DS} = 4V$ , $V_{GS} = -0.56V$ 为静态工作点,得到偏置电阻 $R_c = 50$ , $R_d = 90$ 。隔直电容和旁路电容均选取 $3.6pF$ ,扼流电感分别为 $2.7nH$ (栅极)和 $3.9nH$ (漏极),加入扇形微带开路线,源极电感 $0.36nH$ ,此时稳定性系数 $K = 1.016$ 为最大, $NF_{min} = 0.886$ ,最佳输入阻抗为 $50(0.343 - j0.607) = 17.15 - j30.35$ 。

根据式(4),输入功率匹配条件会导致 $\Gamma_{opt} = 0$ ,当 $|\Gamma_L| = 0$ 时,由输入功率匹配条件可知 $\Gamma_{opt} = S_{11}^*$ 。图2中栅极和漏极匹配网络的引入须将源阻抗和负载阻抗变换至呈现出场效应管所需的 $\Gamma_s$ 和 $\Gamma_L$ 。为使得入射到参考平面1里的 $T_{s,1}$ 最小,首先按照最佳匹配条件设计输入匹配网络使得 $\Gamma_s = \Gamma_{opt}$ 。其次按输入功率匹配条件,设计 $\Gamma_{in} = \Gamma_{opt}^*$ 。

设计输入阻抗匹配网络由开路短截线和串联传输线构成, $S_{11} = -56.838dB$ 达到最小,此时 $Z_{in2}$ 为

$29.853 - j15.773$ 。设计输出阻抗匹配网络,调谐栅极串联传输线和开路短截线,得到最小的 $S_{11} = -68.91$ , $|\Gamma_L| = 0.042$ 。

由于设计过程是对输入输出匹配网络分别仿真,而未考虑二者间的相互影响,因而对上述过程进行反复迭代。最终得到的ADS仿真结果如图3所示,6.8GHz处的 $|\Gamma_L| = 0.014$ 逼近零值,达到仿真最小。

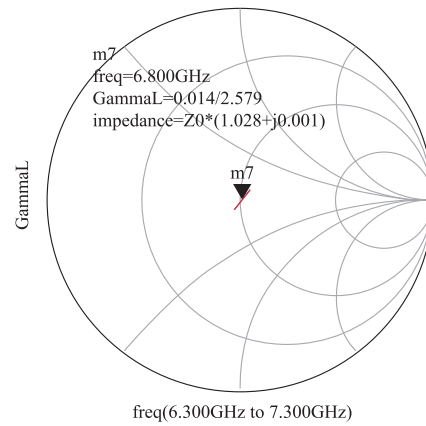


图3  $|\Gamma_L|$ 逼近零的仿真结果

图4表示了ACNS的设计流程。

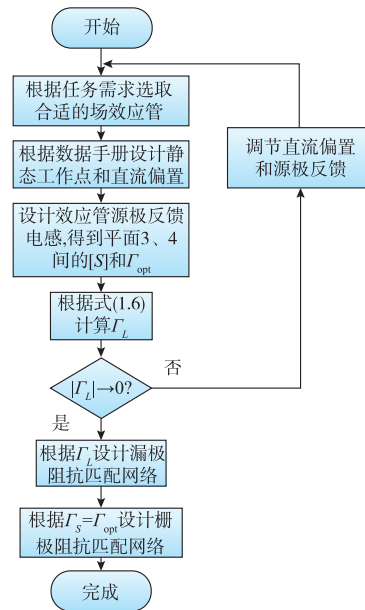


图4 ACNS设计流程图

研制的C波段ACNS器件核心电路ADS仿真图、版图和实物图如图5所示。

### 5 测试结果与分析

本文采用实时定标的微波辐射计对研制的ACNS进行测试,两个标准定标源亮温分别为78K和330K,且辐射计自带内部噪声源作参考。

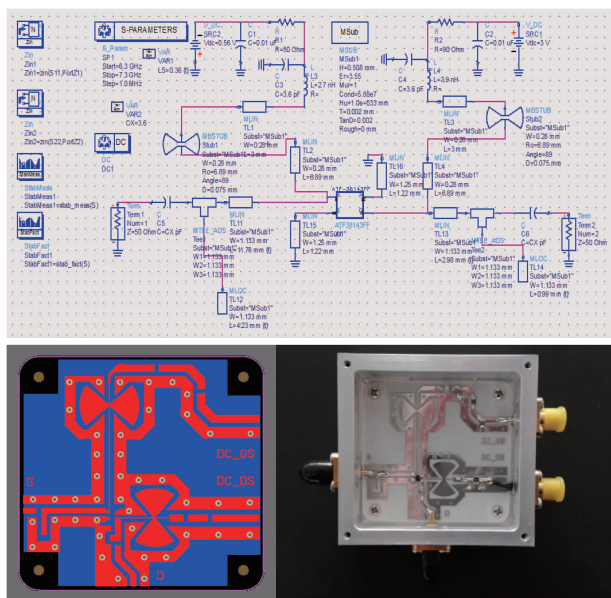


图5 C波段ACNS核心器件电路图

在进行输出噪声温度测试时,C波段微波辐射计前端交替地在内定标源和天线馈线间切换,而天线馈线又交替地连接常温匹配负载、液氮制冷匹配负载和C波段有源微波冷噪声源.图6为噪声温度测试原理图.

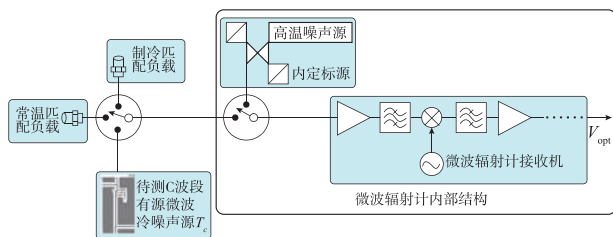


图6 噪声温度测试原理图

文献表明,ACNS输出噪声温度受到环境温度的影响,因此测试过程中采用半导体制冷和薄膜加热构建控温电路.图7为C波段ACNS实验室测试装置图.

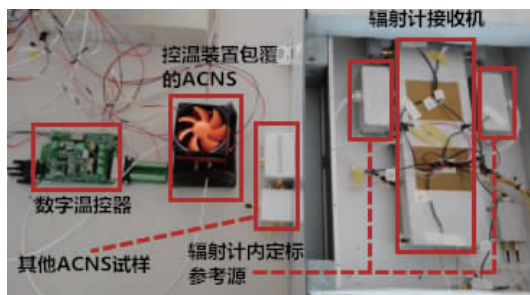


图7 C波段ACNS测试系统

### 5.1 噪声功率随偏置和温度的变化关系

首先恒定ACNS环境温度于27.0℃,测试其输出噪声温度随偏置条件的变化关系.ACNS输出噪声亮温受到直流偏置、源极反馈、匹配网络等影响,在各电路参数

确定之后,只有余直流偏置可灵活变化.实验中综合调谐漏源电压 $V_{ds}$ 和栅源电压 $V_{gs}$ ,得到在 $V_{ds} = 4.00V$ , $V_{gs} = -0.483V$ 处该ACNS输出亮温最小值137.8K.图8为27.0℃恒温条件下ACNS输出亮温随偏置变化实测数据,共计19个偏置点.图8(a)为 $V_{gs} = -0.483V$ 时亮温随 $V_{ds}$ 变化情况,图8(b)为 $V_{ds} = 4.00V$ 时亮温随 $V_{gs}$ 变化情况.可以看出,该ACNS输出亮温在 $V_{ds} < 2.5V$ 或 $V_{gs} > -0.3V$ 时急剧增大,而在 $V_{ds} = 3 \sim 5V$ 且 $V_{gs} = -0.8 \sim -0.4V$ 时相对平坦,未超过150K,测试结果与设计仿真相吻合.

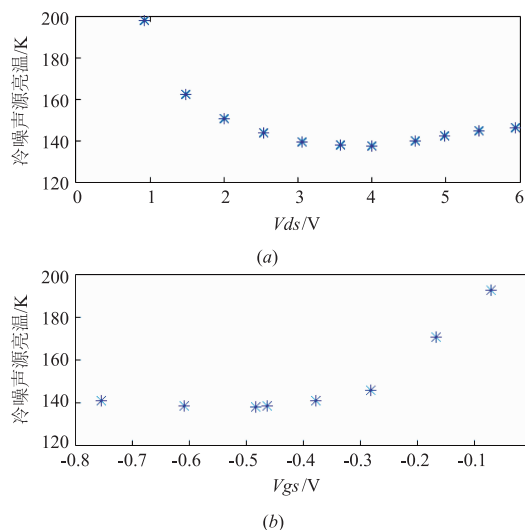


图8 C波段有源微波冷噪声源输出亮温随偏置条件变化情况

根据恒温测试结果,恒定该ACNS直流偏置为 $V_{ds} = 4.00V$ , $V_{gs} = -0.483V$ ,进行16-47.0℃的变温测试.测试共选取10个温度点,各点实际测量结果及拟合曲线如图9所示,0.98的线性相关系数表明ACNS输出亮温与环境温度间呈明显的线性关系;输出亮温随环境温度变化率约为1.9K/℃.

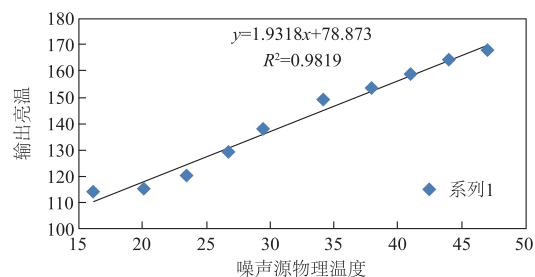


图9 C波段ACNS输出亮温随环境温度变化关系

### 5.2 稳定性测试

该ACNS的稳定性测试结果如图10所示,测试了连续8小时共1750余点的输出性能,整个测试过程维持ACNS物理温度于27℃.图10(a)为长时测量的原始数据,展示了本次1750多个时刻实测噪声温度波动情

况;图 10(b)为对原始数据每半小时进行一次统计的统计结果.测试表明,该 ACNS 在六小时的连续工作中输出噪声温度均值基本恒定,置信区间稳定.

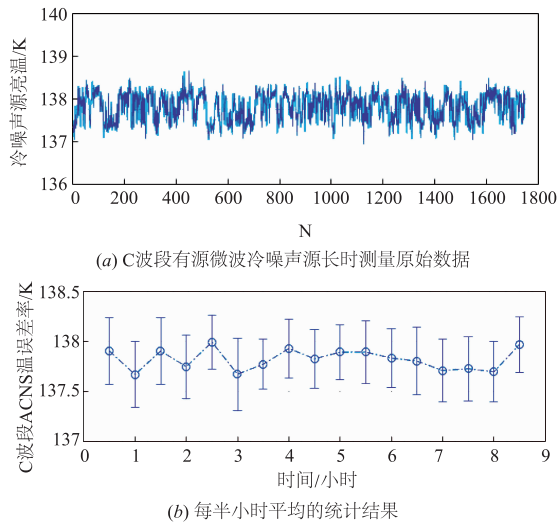


图10 C波段有源微波冷噪声源稳定性测试结果

## 6 结束语

本文首先介绍了有源微波冷噪声源概念及其研究现状,随后在微波冷噪声理论的基础上给出了完整的有源微波冷噪声源设计方案,设计了 C 波段有源微波冷噪声源器件.实验测得常温条件下 C 波段有源微波冷噪声源最低输出亮温为 137.8K,噪声输出稳定.本文在实测数据的基础上分析了有源微波冷噪声源受偏置条件和环境温度因素的影响,分析结果有助于其更进一步的工程应用.

### 参考文献

- [1] 陆浩,王振占,等.全极化微波辐射计系统中高速数字相关器设计[J].电子学报,2011,39(12):2831-2835.  
LU Hao, WANG Zhen-zhan, et al. Design of high-speed digital correlator in fully polarimetric microwave radiometer [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(12): 2831-2835. (in Chinese)
- [2] 王新彪. Ka 波段模拟型全极化微波辐射计研究[D].北京:中国科学院空间科学与应用研究中心,2011.  
WANG Xin-biao. Study on ka-band analog fully polarimetric microwave radiometer[D]. BJ: National Space Science Center, CAS, 2011. (in Chinese)
- [3] 赵瑾.固定波束指向星载微波辐射计及定标方法研究[D].北京:中国科学院空间科学与应用研究中心,2010.  
ZHAO Jin. Calibration of spaceborne microwave radiometer with fixed-beam pointing[D]. BJ: National Space Science Center, CAS, 2010. (in Chinese)
- [4] 李靖,张俊荣,等.数字增益补偿及实时定标微波辐射计[J].电子学报,1999,27(3):49-51.
- [5] LI Jing, ZHANG Jun-rong, et al. Computer gain compensative and continuously calibrated microwave radiometers [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(3): 49-51. (in Chinese)
- [6] Pucel R A, Haus H A, et al. Signal and noise properties of gallium arsenide microwave field-effect transistors [J]. Advances in Electronics & Electron Physics, 1975, 38: 195-265.
- [7] Robert H F, David R W. An active "cold" noise source [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1981, 29(4): 344-347.
- [8] Peter B W, Steven M L, et al. Design and characterization of fet based cold/hot noise sources [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(1): 1293-1296.
- [9] Buhles P M, Lardizabal S M. Design and characterization of MMIC active cold loads [A]. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium [C]. Boston, USA: IEEE Press, 2000. 221-225.
- [10] Ciccognani W, Giannini F, et al. Analysis, Design and Measurement of Active Low-Noise Terminations [A]. 14th Conference on Microwave Techniques (COMITE) [C]. Prague, HUN: IEEE Press, 2008. 1-4.
- [11] Sobjaerg S S, Skou N, et al. Measurements on active cold loads for radiometer calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(9): 3134-3139.
- [12] Jarrige E L, Escotte L, et al. SiGe HBT-Based Active Cold Load for Radiometer Calibration [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010, 20(4): 238-240.
- [13] Jarrige E L, Escotte L, et al. SiGe HBT-based active cold load: design, characterization and stability measurements [A]. 21st International Conference on Noise and Fluctuations [C]. Toronto, ON: IEEE Press, 2011. 332-335.
- [14] Jarrige E L, Escotte L, et al. Stability analysis of an sige hbt-based active cold load [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(2): 354-359.
- [15] Robert S, Zoya P. A 1.4 GHz MMIC active cold noise source [A]. Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS) [C]. Monterey, CA: IEEE Press, 2013. 1-4.
- [16] Ernst W, Axel T, et al. Active load modules for W-Band radiometer calibration [A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. Munich, DE: IEEE Press, 2012. 2945-2948.
- [17] Sebastian D, Ernst W, et al. A W-band monolithic integrated active hot and cold noise source [J]. IEEE Transac-

- tions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(3): 623 – 630.
- [17] Mikko K, Ernst W, et al. Active cold load MMICs for Ka-, V-, and W-bands [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2015, 9(8): 742 – 747.
- [18] 李青侠, 张祖荫, 等. 室温下的微波有源“冷”噪声源 [J]. 微波学报, 1994, 38(3): 28 – 32.
- LI Qing-xia, ZHANG Zu-yin, et al. Active ‘cold’ noise source on room temperature [J]. Chinese Journal of Microwave, 1994, 38(3): 28 – 32. (in Chinese)
- [19] Weatherspoon M H, Dunleavy L P. Experimental validation of generalized equations for FET cold noise source design [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2006, 54(2): 608 – 614.

### 作者简介



**董 帅** 男. 1988 年 8 月出生, 山东烟台人. 2011 年、2016 年分别在北京理工大学、中国科学院大学获得工学学士、工学博士学位. 现为北京无线电测量研究所设计师, 主要从事微波遥感技术研究, 包括微波辐射计系统及定标研究、毫米波天气雷达系统研究等.

E-mail: dongshuaihy@sina.com



**王振占** 男. 1969 年 12 月出生, 河北秦皇岛人. 研究员, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”引进人才. 2005 年于中国科学院获得理学博士学位. 现为中科院空间中心微波遥感技术重点实验室研究员, 主要从事微波遥感新技术及应用技术研究, 重点包括全极化微波辐射测量技术研究、海洋大气参数的反演应用研究、微波遥感器的定标/检验技术研究等.