

文章编号: 2095-4980(2018)04-0672-04

用于雷达接收机检测的平面固态噪声源

赵 晖, 刘 锋, 李 庆

(中国航空工业集团公司 雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

摘 要: 设计了集成固态噪声源以测得雷达接收机的增益和噪声系数。设计采用国产噪声二极管开发平面集成固态噪声源用于接收机性能检测, 包括噪声二极管集成、耦合器、驱动开关电路等。研究了平面集成固态噪声源超噪比(ENR)的测量方法, 以及接收机噪声系数和增益的计算公式。固态噪声源和接收机电路无缝集成, 极大减小了体积质量。设计的噪声源实现了 28 dB 的超噪比, 较好地满足了接收机的检测要求, 自检误差在可接受范围内。本设计通过了各类环境试验, 并在实际产品中得到应用, 取得较好的效果。

关键词: 噪声源; 接收机; 噪声二极管

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0672

Planar solid-state noise source for radar receiver test

ZHAO Hui, LIU Feng, LI Qing

(Radar and Avionics Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: The solid-state noise source integrated in the radar receiver is suggested to detect the noise figure and gain by itself. The planar solid-state noise source is designed for the receiver built-in-test, including the homemade noise diode integration, the coupler design and the drive/switch circuit design. The measure method of Excess Noise Ratio(ENR) of the noise source integrated in a receiver is presented, and the noise figure and gain can be calculated from ENR. The seamless integration with the noise source on the same substrate reduces the complexity, size and weight of the receiver. The measured and calculated results show the ENR of the noise source reaches 28 dB and satisfies the detection requirements. The detection error is acceptable. The designed circuit runs well in the environment experiments and the practical applications.

Keywords: noise source; receiver; noise diodes

接收机的噪声系数和通道增益关乎雷达系统的性能指标, 对该指标的实时测量校准具有重要意义。但是当接收机集成在航电系统中时, 很难在工作状态下实时跟踪指标的变化。通过把固态噪声源集成进入接收机, 即可通过 Y 因子法计算接收机的噪声系数和通道增益。该方法通过内部软件控制完成系统的地面自检和工作状态中自检。减少对外部测试仪表的需求, 提高了检测效率, 并可以为故障预测提供大量数据。

微波固态噪声源是近年来发展起来的一种噪声源, 具有开关迅速稳定、体积小、寿命长等优点。在遥感、微波辐射计、噪声测量、雷达整机性能自动监测等方面获得广泛应用。固态噪声源通过噪声二极管直接产生白噪声。在接收机中, 产生的白噪声经耦合器馈入接收前端, 耦合器位于第一级低噪声放大器之前, 该设计可以为接收通道提供 12 dB 以上的超噪比(ENR)。通过开关噪声源, 使得输入接收通道的噪声功率出现冷态和热态 2 个状态, 通过 Y 因子法即可求得噪声系数和增益。国内在噪声源方面有一些研究, 顾世惠^[1]开发了噪声二极管, 还有一些文献报道了开发的噪声源模块^[2], 以及噪声相关的测试^[3-8]。

本文采用南京电子器件研究所开发的噪声二极管, 设计了应用于雷达接收机的 X 波段平面集成固态噪声源, 包括固态噪声二极管的集成、耦合和驱动。给出了固态噪声源超噪比的测试方法, 以及通过超噪比, 计算接收机通道噪声系数和增益的公式。固态噪声二极管及其驱动电路和接收机链路无缝集成, 极大减小了体积和质量。该电路在实际工程上得到了应用, 并取得了较好的效果。

1 基本原理

噪声计量和噪声测量中，噪声量值用 ENR 表示，单位为 dB，定义如下：

$$ENR = 10 \log \frac{T_n - T}{T} \tag{1}$$

式中： T_n 为噪声温度； $T = T_0 = 290 \text{ K}$ 。

半导体器件的噪声一般由热噪声、散弹噪声、闪烁噪声 3 部分组成。当二极管 PN 结处于雪崩击穿状态时，载流子雪崩倍增的电流起伏引起半导体雪崩散弹噪声，在一定频率下等效为白噪声。因此可以采用雪崩二极管的原理来设计固体噪声源。

通过对 Hines 雪崩噪声理论的推导和简化，可以获得硅器件的雪崩噪声的频率功率密度和雪崩频率^[1]：

$$W_n(\omega) \approx \frac{a^2 U_b^2}{4IR_{sc}} \tag{2}$$

$$f_a = \sqrt{\frac{7.6I}{U_b A}} \tag{3}$$

式中： $a^2 = qk^2 \tau_v^2 / 3m^2 \tau_x^2$ ，该参数与半导体器件的材料、几何尺寸有关系； U_b 为击穿电压； I 为雪崩电流； R_{sc} 为空间电荷电阻； A 为击穿面积。在 $\omega \ll \omega_a$ 时，功率谱密度与频率无关，近似为白噪声。在 $R_{sc} = R_L$ 的条件下，能获得最大的噪声输出。公式显示，输出功率和 U_b^2 成正比，和 I 成反比。

根据中电集团第 55 研究所器件手册，噪声二极管使用 10 V 电压，15 mA 电流，可以获得 25 dB 的 ENR 值，如减小电流，可以获得更大的 ENR。同样，用放大器放大基底噪声也可以获得较大功率的白噪声。为了获得 30 dB 的 ENR，需要两级放大器，5 V 电压下耗电 100 mA 左右。因此，通过放大器获得白噪声从体积功耗来讲不经济。

2 电路设计

2.1 器件模型

处于雪崩击穿状态的噪声二极管等效电路如图 1 所示。空间电荷电阻 R_{sc} 值为 50Ω ，电阻 R_{sp} 的值尽量小时，传输到负载 R_L 上的功率最大。

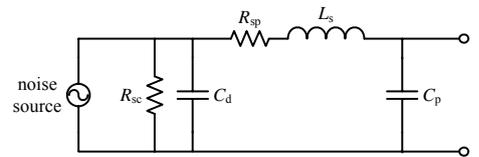


Fig.1 Equivalent circuit of the noise diode
图 1 噪声二极管等效电路

2.2 应用电路

噪声二极管构成的噪声源设计在接收机的输入端一侧，噪声功率通过 15 dB 的微带耦合器耦合进入微带线，耦合器后面接低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)，框图如图 2 所示。在接收机电路中的噪声源采用微带结构。噪声二极管雪崩频率远高于 X 波段，ENR 标称值为 25 dB，该噪声二极管管壳外形为小圆柱体。

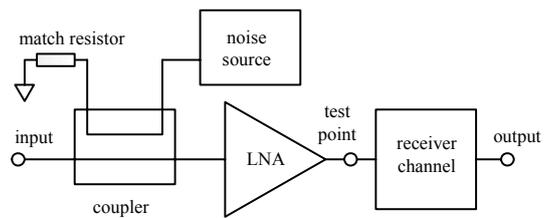


Fig.2 Schematic diagram of the receiver
图 2 接收机框图

噪声二极管的应用电路如图 3 所示，噪声二极管在一个反向电压下满足雪崩击穿条件，并进入工作状态，产生的白噪声通过微波电容 C_b 耦合进入接收机传输线。

2.3 驱动电路

噪声二极管需要被钳制在合适的工作电流上，因此设计了镜像电流源作为驱动电路，电流源用到了 2 只 NPN 晶体管 Q_1 和 Q_2 。同时为了能够开关噪声二极管，设计了开关电路，包括 PNP 三极管 Q_3 和 NPN 晶体管 Q_4 。电路的供电需要用到 +5 V 和 -15 V。电路如图 4 所示，驱动电路在 Multisim 软件中进行了仿真实验验证。

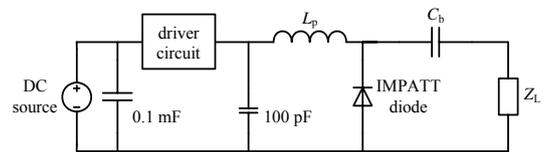


Fig.3 Practical circuit of the noise diode
图 3 噪声二极管应用电路

2.4 版图设计

版图设计对于微波功能的实现具有很大的重要性。本设计应用在 X 波段，基板使用 20 mil 厚的 Rogers 5880 基材。把噪声二极管 D_2 圆柱卧倒放置于基板上，焊接平帽和管腿，使得噪声二极管能够较为可靠地装配固定至

平面电路上,二极管需要注意极性正确放置。噪声二极管通过隔直电容 C_2 把噪声信号送出,并经过耦合器,进入接收微带线,并由低噪声放大器放大。噪声二极管的电源扼流功能由扇形片和电源滤波电容 C_3 构成。耦合器的另外一端接负载电阻 R_1 。其中, C_1 和 C_2 为 0603 封装的高 Q 值电容,容值大致为 2 pF。 R_1 为 1608 封装的电阻,阻值为 51 Ω 。版图如图 5 所示。

3 有效超噪比测量

由于噪声二极管性能有一定的离散性,对集成的噪声二极管电路进行测量有助于提高接收机噪声系数和增益的计算精确度。采用噪声仪测试是一种简单的方法,在图 2 所示框图中的测试点断开低噪声放大器和后面接收电路的连接,把低噪声放大器的输出接到噪声仪。

测量噪声源在热态和冷态下低噪声放大器输出端的噪声系数,由 Y 因子法间接可得到噪声源的 ENR 值:

$$ENR = 10 \log C_m (F_2 - F_1) \quad (4)$$

式中: C_m 是耦合器耦合系数; F_2 是噪声源热态下由噪声仪测得的噪声系数; F_1 是噪声源冷态下噪声仪测得的噪声系数。噪声源的等效超噪比为 ENR_{eff} :

$$ENR_{\text{eff}} = 10 \log (F_2 - F_1) \quad (5)$$

等效噪声源把耦合进来的噪声看作来自信号输入端,忽略耦合器的存在,使用 ENR_{eff} 在接收机指标检测中进行计算。由式(5)可见,用耦合器引入噪声的方式较大幅度地降低了系统的有效超噪比,因此检测精确度有一定的下降。噪声二极管与低噪声放大器电路的等效超噪比测量在室温的实验室内进行。

4 接收机指标测量

等效噪声源有热态和冷态 2 种状态:热态下噪声源打开,噪声功率输入接收机;冷态时噪声源关闭,接近常温的负载连接到接收机输入端。接收机对 2 种状态的噪声功率进行放大、变频和采样,并在数字域计算噪声功率。令等效噪声源处于热、冷 2 种状态下,测出的噪声功率 N_H 和 N_C 的比值为 Y ,则接收机内部噪声的等效输入噪声温度为:

$$T_e = \frac{T_H - Y T_C}{Y - 1} \quad (6)$$

式中: T_H 为等效噪声源处于热态时的噪声温度; T_C 为等效噪声源处于冷态时的噪声温度。噪声系数定义为:

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (7)$$

式中 T_0 代表常温下的噪声温度。令 $T_0 = T_C$, 将式(6)代入式(7)可以得到接收机噪声系数:

$$F = \frac{T_H - T_C}{T_C (Y - 1)} \quad (8)$$

对数表示为 $F_{\text{dB}} = ENR_{\text{eff}} - 10 \log(Y - 1)$ 。

同样,可以获得接收机增益:

$$G_{\text{dB}} = 10 \log(Y - 1) N_C / (k T_C B) - ENR_{\text{eff}} \quad (9)$$

式中: k 为玻兹曼常数; B 为检测噪声带宽。

放大器的增益以及噪声二极管的输出功率都与环境温度有关。放大器通过偏置电路设计和温补衰减器来降低增益对温度的敏感度,噪声二极管的输出功率相对温度变化较小,因此热态噪声功率 N_H 的变化可以得到控制。冷态噪声功率和环境温度直接线性相关,可以通过测量环境温度来间接计算室温的冷态噪声功率 N_C 。接收机自检

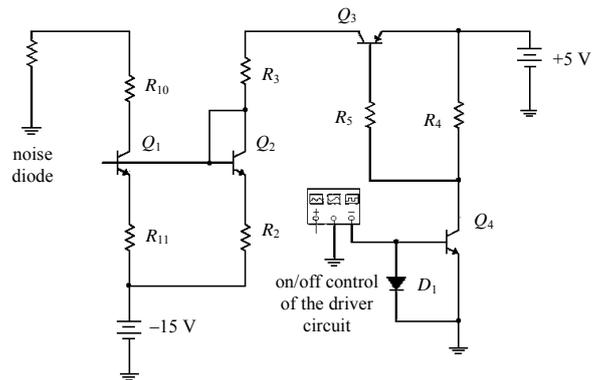


Fig.4 Driver circuit of the noise diode
图4 噪声二极管驱动电路

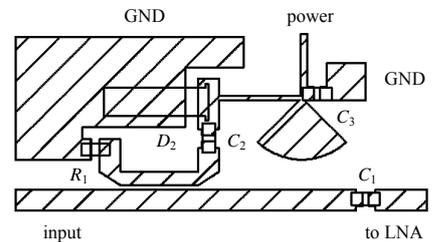


Fig.5 Microwave part of the noise source layout
图5 噪声源射频部分电路版图

对测量的不确定度要求不高,通过以上方法即可获得满足要求的测量结果。

所设计的噪声源如图5所示。其中耦合器耦合量为 -16 dB ,噪声二极管驱动电流 10 mA ,用噪声仪测得 ENR_{eff} 为 12 dB ,噪声源的 ENR 为 28 dB 左右。为了获取更大的超噪比,用了比器件推荐值稍小的驱动电流,超噪比测量值略大于器件的标称值。

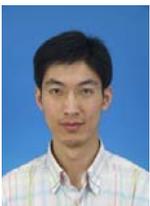
5 结论

采用国产的噪声二极管,开发了用于接收机性能检测的平面集成噪声源,包括耦合器、噪声二极管偏置电路、驱动开关电路等。根据 Y 因子法,研究了平面集成噪声源超噪比的测量方法,以及接收机噪声系数和增益的计算方法,实现了机内对接收机主要指标的自检。相比发射信号回灌的方法,本文方法功能更加丰富,质量体积更加轻小。通过合理的设计,噪声源实现了 28 dB 的超噪比,较好地满足了接收机的检测要求,自检误差在可接受范围内。本设计通过了各类环境试验,在实际产品中得到应用,具有良好的可靠性,在接收机系统中有较广泛的应用潜力。

参考文献:

- [1] 顾世惠. 微波固体噪声二极管频率上限和噪声输出功率性能的研究[J]. 电子学报, 1986,14(6):73-78. (GU Shihui. Study of upper frequency limit and noise output power characteristics for microwave solid state noise diodes[J]. Acta Electronica Sinica, 1986,14(6):73-78.)
- [2] 张长明. 高超噪比微波固态噪声源设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2006,26(2):194-196. (ZHANG Changming. Design of microwave solid-state noise source with high exceed noise ratio[J]. Research & Progress of SSE, 2006,26(2):194-196.)
- [3] 栾卉,赵凯. 脉冲调制固态噪声源的分析与测试[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007,26(4):566-569. (LUAN Hui, ZHAO Kai. Analysis and test of pulse modulated solid noise source[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(4):566-569.)
- [4] 周宏伟,李凤. 微波噪声标准系统不确定度分析[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2006(1):34-39. (ZHOU Hongwei, LI Feng. Analysis of the uncertainty of microwave yawp standard system[J]. Instrument and Metrological Technology, 2006(1):34-39.)
- [5] 张希富,张强. 噪声源校准方法及不确定度分析[J]. 宇航计测技术, 2012,32(1):49-55. (ZHANG Xifu, ZHANG Qiang. The analysis of the measurement method and the measurement uncertainty for noise source[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2012,32(1):49-55.)
- [6] 魏竹,张翠翠,王建忠,等. 噪声系数测量中的温度修正方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):736-739. (WEI Zhu, ZHANG Cuicui, WANG Jianzhong, et al. Temperature correction methods for noise figure measurement[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):736-739.)
- [7] 吴明宇,杨桃丽,吴顺军,等. 2种多通道 SAR/GMTI 相位误差估计方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2):213-217. (WU Mingyu, YANG Taoli, WU Shunjun, et al. Two phase error estimation methods for multi-channel SAR/GMTI systems[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):213-217.)
- [8] 唐晓雷,张令坤,陈飞,等. 通道幅相误差对数字阵列天线性能影响及校准[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(4):562-566. (TANG Xiaolei, ZHANG Lingkun, CHEN Fei, et al. Effect of channel amplitude/phase errors on digital array performance and calibration[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):562-566.)

作者简介:



赵 晖(1981-),男,江苏省无锡市人,博士,高级工程师,主要研究方向为雷达接收机及TR组件等. email:jswx607@sina.com.

刘 锋(1981-),男,江苏省无锡市人,工程师,主要研究方向为雷达接收机等.

李 庆(1988-),男,江苏省徐州市人,工程师,主要研究方向为雷达接收机等.