

# 微波功率测量中的小信号检测

冷朋 赵浩

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555)

**摘要:**现代微波功率测量仪器大多采用基于微波二极管检波方式的微波功率传感器进行功率测量。二极管功率传感器具有功率测量动态范围大、灵敏度高的优点,但在进行微波小信号检测时输出电压非常小,受噪声影响大,非常难以检测。分析了微波功率传感器中影响小信号检测的噪声来源,针对这些影响小信号功率测量的噪声,从检波电路、斩波电路以及数据采集电路等方面综合进行设计,有效地提高了微波小信号的功率测量灵敏度和准确度。应用于新型微波功率测量仪器中,取得了很好的效果。

**关键词:**小信号检测;二极管检波;斩波;噪声

**中图分类号:** TM933.3 TN98 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 510

## Weak signal detection in microwave power measurement

Leng Peng Zhao Hao

(The 41st Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** The common techniques used for sensing microwave power are based on diode detectors. The diodes used for detecting microwave power feature the advantages of wide dynamic range and high sensitivity. But when a low power level microwave signal is applied to a diode detector, the output is a DC or low-frequency voltage with very low amplitude, which is effected greatly by all kinds of noise. This paper firstly discussed the diversity of noise resources. And then according to these causes, several weak signal detecting techniques are integrated to sensor the low power level in a creative way. The innovative methods involve the detecting circuits, chopping amplifier and data acquisition and so on. The results show these methods can dramatically improve the microwave power measurement sensitivity and accuracy. These methods have been deployed into a new model power measurement instrument and the effects are obviously great.

**Keywords:** weak signal detection; diode detection; chopping amplification; noise

### 1 引言

现代微波功率计主要采用主机外接微波功率传感器的配置方式,为了满足功率测量动态范围、带宽和测量速度的要求,微波功率传感器大都采用微波二极管检波方式进行功率测量<sup>[1-2]</sup>。微波检波二极管种类很多,性能好的有低势垒肖特基(LBS)二极管、平面掺杂势垒(PDB)二极管等,此类二极管频率范围可工作至40 GHz,检测功率电平低至 $-70$  dBm ( $100$  pW)<sup>[3-4]</sup>。在检测 $-70$  dBm ( $100$  pW)的功率电平时,二极管检波器的输出电压只有约 $50$  nV,这么低的信号电平很容易淹没在噪声中,没有相应的检测方法和电路很难进行检测处理。传统的小信号检测与处理方法,功率检测灵敏度只能达到约 $-60$  dBm

( $1$  nW),满足不了功率测量产品的 $-70$  dBm的功率灵敏度指标要求。本文针对微波功率测量中低于 $-50$  dBm的小信号功率检测要求,对影响功率测量灵敏度的噪声来源进行分析,针对这些噪声干扰采用多种检测方法进行处理,最终提高功率测量灵敏度并实现小信号微波功率的准确测量。

### 2 功率小信号的检测

#### 2.1 影响小信号检测的噪声来源

影响微波功率传感器测量灵敏度指标的因素主要是噪声信号<sup>[5-6]</sup>,微波功率传感器中影响小信号检测的噪声来源主要包括固有噪声和干扰噪声,固有噪声主要包括热噪声、PN节散射噪声、 $1/f$ 噪声等,干扰噪声主要包括射

频噪声和地电位差噪声等。噪声分类如图1所示。

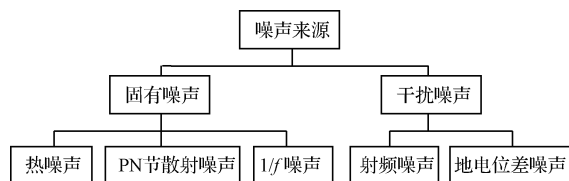


图1 微波功率传感器中的主要噪声来源

在电子系统内部几乎所有的器件本身就是噪声源，在各种检测设备内部，固有噪声将最终影响系统的性能。热噪声、PN节散射噪声和 $1/f$ 噪声都是固有噪声的重要组成部分。固有噪声也是检测电路中最难通过处理消除的噪声成分。热噪声的产生是由电阻、半导体等器件性质决定的，最有效的削弱热噪声的方法就是选用小的阻值和减小放大器带宽，同时可以引入差分电路，以抵消温度对热噪声的影响。PN结的散射噪声又称作散粒噪声，与通过势垒的电流有关，减小散射噪声带来的不利影响，必须使通过PN节的直流电流越小越好。 $1/f$ 噪声是由两种导体的接触点电导随机涨落引起的，凡是有导体接触不理想的器件都存在 $1/f$ 噪声。

干扰噪声的种类很多，对微波功率传感器设计影响最大的是射频噪声和地电位差噪声，这两种均属于电噪声。射频噪声多数是调制电磁波，也含有随机成分，检测电路中的导线可以看作接收天线，不同程度地接收空间中存在的射频噪声。地电位差噪声产生的原因主要是不同接地点之间存在大小不等的地电位差。电位差的范围从几百微伏到几百毫伏不等，这主要取决于电路的组成结构和采用的接地形式。通过地平面合理的分割和有效地接地方式则在很大程度上可以削弱该类型的噪声<sup>[5]</sup>。

通过对噪声的分析，有针对性地采用以下技术进行设计，从而可提高小信号的功率测量灵敏度和准确度。

## 2.2 检波电路的设计

微波功率传感器采用二极管检波的方式来实现微波功率测量，检波二极管选用平面掺杂势垒(PDB)二极管。平面掺杂势垒(PDB)二极管其金属半导体结能够满足高速检波特性，它的结电容非常小(20 fF 或者更小)，这样器件的平方率特性与频率的变换关系更稳定，低势垒设计在0 V时给出最大灵敏度，允许二极管没有偏置被使用，使得功率传感器的灵敏度更高。

除了采用性能优异的器件，在设计中采用了双二极管的平衡配置方式，这种配置方式有以下几个方面的优点：

- 1) 消除了功率电平低于1 nW 时由不同金属连接所导致的热电压影响。
- 2) 抑制了微波信号偶次谐波造成的测量误差。
- 3) 两个二极管使得检波信号电压加倍(功率为4倍)，而噪声输出因主要的噪声源不相关，所以噪声功率只增加1倍。
- 4) 检波输出端地面上的共模噪声或干扰被抵消。

采用双二极管检波方案，在一定程度上提高了检测灵敏度和信噪比以及功率传感器的温度稳定性<sup>[7]</sup>。

## 2.3 斩波电路的设计

对应 $-70 \sim +20$  dBm 的功率输入，二极管检波组件输出的检波电压大约在低于50 nV~1.4 V，对于检波后的直流微弱信号的测量， $1/f$ 噪声通常是最主要的噪声源。为了提高并保证功率传感器的灵敏度指标，采用了斩波<sup>[8]</sup>放大技术将信号调制到频率较高的交流信号上，以规避 $1/f$ 噪声的影响，然后再逐级放大和处理。

斩波放大技术是一种连续时间方法，它采用调制和解调的方法，将 $1/f$ 噪声和失调电压调制到高频端，并用低通滤波器滤除，有用信号经过调制后，又解调回基带，消除了白噪声混叠的缺点。

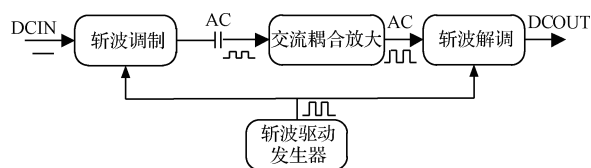


图2 斩波放大和同步检波原理

如图2所示为微波功率传感器所采用的斩波放大和同步检波技术原理，斩波单元利用电子开关实现对微弱信号的幅度调制和解调，斩波放大部分主要由斩波调制单元、交流放大单元和解调单元3部分构成。直流或低频小信号首先进入由方波发生器驱动的斩波器，利用开关器件轮流导通和关断，将输入的直流微弱信号转化成与斩波驱动信号频率相同的交流方波信号，斩波信号经过电容交流耦合后，经过交流放大器的高增益放大和低通滤波，最后经过由交替开关构成的同步解调单元对信号进行去斩波，实现交流信号到直流信号的转换。斩波后的信号要进行低噪声放大，放大器采用低直流电流的晶体管和运算放大器组成的级联负反馈形式实现斩波信号的初步放大，再进行低通滤波和数模转换，从而实现了微弱信号的采集和处理。针对干扰噪声，设计时主要以增加电磁屏蔽和完整的地平面来处理，通过合理的PCB布局布线和接地方式处理来削弱环境干扰噪声的影响。

## 2.4 基于过采样的数据采集电路设计

为了提高功率测量灵敏度，后续数据采集单元采用了基于过采样的数据采集方案，采用 $\Sigma-\Delta$ 转换技术进行设计<sup>[9]</sup>。 $\Sigma-\Delta$ 转换技术是一种采用过采样、噪声成形、数字滤波和抽取等技术的一种模拟数字转换技术，其原理如图3所示。该技术首先利用过采样技术，以 $k$ 倍的奈奎斯特采样频率 $kfs$ 对信号进行过采样，使噪声能量分散到更宽的频带上，从而提高信噪比。对于一个 $N$  bit ADC，总的信噪比表示为 $SNR=6.02N+1.76$  dB。为了改善SNR和更为精确地再现输入信号，对于传统ADC来讲，必须增加位数。而如果将采样频率提高一个过采样系数 $k$ ，即采样频率为 $kfs$ ，快速傅里叶变换(FFT)分析显示噪声基线

降低了, SNR 值未变, 但噪声能量分散到一个更宽的频率范围。实际上到  $f_s/2$  的噪声功率却减少了, 对于给定采样频率的  $N$  bit ADC 经过采样以后  $f_s$  范围内的量化噪声功率变为总噪声的  $1/K$ , 相当于 SNR 增加了  $10\log_{10}K$  dB, 因此总的信噪比可表示为  $SNR=6.02N+1.76+10\log_{10}K$  dB。这样采样频率每提高 1 倍, SNR 将提高 3 dB。

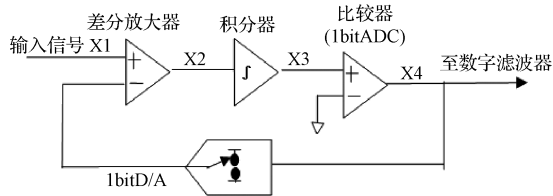


图 3  $\Sigma$ - $\Delta$  转换原理

具体设计中采用了 24 位  $\Sigma$ - $\Delta$  过采样双通道 ADC, 24 位 ADC 器件采用四阶 64 倍过采样  $\Sigma$ - $\Delta$  技术, 由于采用过采样和噪声成形技术, 能够使信号的带内量化噪声得到抑制, 带内信噪比得到加强, 具有极高的精度和线性度, 其信噪比达到 116 dB。

### 3 测试结果

上述技术已经应用到微波功率测试仪器中, 配接频率范围到 40 GHz 的微波功率传感器, 测试频率为 40 GHz、功率电平为  $-70$  dBm (100 pW) 的信号功率准确度和稳定性, 每隔 5 min 读取一次功率值, 数据曲线如图 4 所示, 其中横坐标为时间 (min), 纵坐标为功率 (dBm)。

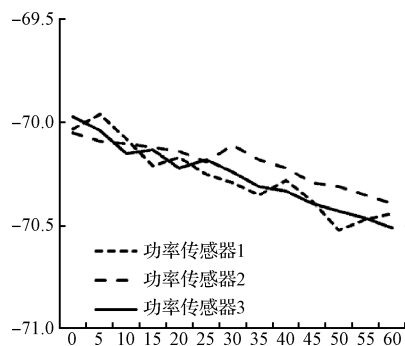


图 4 测试  $-70$  dBm 的准确度和稳定性

从测试结果来看, 在 1 h 的测量中, 抽取的 3 个功率传感器在  $-70$  dBm (100 pW) 功率电平下的测试误差均不超过  $\pm 0.7$  dB。说明采用上述大动态范围微弱信号检测技术设计的微波功率传感器, 其灵敏度和功率测量准确度指标满足设计要求。

上一代功率测量产品 AV2432 微波功率计配接的 AV23210 系列微波功率传感器, 其灵敏度指标为  $-60$  dBm, 在  $-60$  dBm 下的微波功率测量不确定度为  $\pm 1.0$  dB<sup>[10]</sup>。本文研究的微波功率传感器其灵敏度指标相

对提高了 10 dB, 功率准确度也提高了 0.3 dB。

### 4 结论

除了要采用本文中讲述的检波电路设计、斩波电路设计以及采集电路设计等技术外, 在放大电路设计、电磁屏蔽设计、接地设计以及印制板的元器件布局等方面也要进行精心的设计, 上述技术的综合运用才能实现微波小信号的检测, 提高微波信号小功率的测量灵敏度并实现功率的准确测试。

本文研究的功率传感器在微波小信号测试下的指标满足了设计要求, 但从试验与测试情况来看, 微波功率传感器在进行小信号功率测量时, 随着时间的增加, 会因温度、噪声等影响, 测量值还有一定的漂移偏差。在后续的工作中将针对信号的漂移进行分析, 进一步研究减小或消除这种漂移方法。

### 参考文献

- [1] Agilent Technologies. Fundamentals of RF and microwave power measurements[J]. Application Note, 2001:37-38.
- [2] 董树义. 微波测量技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1990:42-45.
- [3] 李金山. 一种基于二极管检波器微波功率测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 251-253.
- [4] 赵浩, 冷朋. 基于二极管检波的功率测量技术研究[J]. 仪器与仪表学报, 2008, 29(4): 655-657.
- [5] 孙建辉, 刘军涛, 徐声伟, 等. 高精度微弱脑电检测数模混合控制芯片系统[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 1025-1033.
- [6] 周平, 汪丰, 刘梦星. 非接触式心电测量的噪声抑制研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2226-2230.
- [7] 曾永权, 陈娟. 便携式余氯检测仪的研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5): 56-60.
- [8] 刘虎, 赵建洋, 周蕾. 基于斩波时域积分射频频导纳物位仪研究与设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 1005-1012.
- [9] 吕富勇, 周瑞卿, 阮世阳. 高频磁场检测中采样保持器的设计及其性能分析[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 13-16.
- [10] 电子测量仪器产品样本(2015-1016)[DB]. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 2016, 153-155.

### 作者简介

冷朋, 1976 年出生, 高级工程师, 工程硕士, 主要研究方向为微波测试仪器与仪表等。  
E-mail: lengpeng\_41@163.com