

文章编号: 2095-4980(2025)01-0024-05

## 一种宽带毫米波幅度检测方法

赵丽萍, 杨秀强, 庞玉会, 张冰, 辜霄, 杨先国, 吴昊

(中国电子科技集团公司第二十九研究所 成都西科微波通讯有限公司, 四川 成都 610091)

**摘要:** 随着近年来电子信息技术的快速发展, 毫米波更多地应用到通信、成像、电子对抗、雷达与制导等系统中。针对当前国产连续检波对数视频放大器(SDLVA)难以在毫米波频段进行连续检波的局限, 提出基于下变频模式的检波电路设计方案。通过采用内置本振源将 26~38 GHz 的射频信号下变频到 3~15 GHz, 再采用国产化 SDLVA 芯片对 3~15 GHz 进行连续检波对数视频放大。产品设计和测试表明, 该毫米波宽带检波可在 -55~+70 °C 宽温度范围内实现 -57 dBm 的灵敏度和 37 dB 的大动态检波输出。产品具有全国产化、小型化的特点, 在宽带毫米波检波中具有较大优势。

**关键词:** 下变频模式; 宽带毫米波检波; 灵敏度

**中图分类号:** TN763.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2024555

## A broadband millimeter wave amplitude detection method

ZHAO Liping, YANG Xiuqiang, PANG Yuhui, ZHANG Bing, GU Xiao, YANG Xianguo, WU Hao  
(Chengdu Seekon Microwave Communication Co., Ltd., The 29th Research Institute of the CETC, Chengdu Sichuan 610091, China)

**Abstract:** With the rapid development of electronic information technology in recent years, millimeter waves have been increasingly applied to communication, imaging, electronic countermeasures, radar, and guidance systems. In response to the limitation that domestic Successive Detector Logarithmic Video Amplifiers(SDLVAs) have difficulty in continuous detection in the millimeter wave band, a detection circuit design scheme based on the down-conversion mode is proposed. By using an internal local oscillator to down-convert the 26~38 GHz RF signal to 3~15 GHz, and then using a domestic SDLVA chip to perform continuous detection logarithmic video amplification on 3~15 GHz, the product design and testing show that this millimeter wave broadband detection can achieve a sensitivity of -57 dBm and a large dynamic detection output of 37 dB in a wide temperature range of -55~+70 °C. The product features full domestication and miniaturization, giving it a significant advantage in broadband millimeter wave detection.

**Keywords:** down-conversion mode; the millimeter wave broadband detection; sensitivity

在现代的射频接收系统中, 检波对数视频放大器是一类常用的信号接收处理设备。简单地说, 就是通过对数转换功能, 将输入的大动态范围的信号浓缩成为足够小的、易处理的信号。

传统的对数视频检波器是先线性响应二极管对输入射频信号进行检波, 然后在对数视频放大器内对检波器的输出进行压缩, 使之近似于一个对数变换函数<sup>[1]</sup>。在国产化需求的大环境下, 以前采用的对数视频放大器在国内尚未找到可替代的产品, 因此改用国产化的连续对数视频检波器(SDLVA)芯片<sup>[2]</sup>实现宽带毫米波对数视频检波。针对现有的国产 SDLVA 芯片无法达到毫米波频段, 提出通过下变频将毫米波频段搬移到常规的微波频段, 再进行检波的方案; 并分别对其进行论证。

### 1 主要技术指标

- 1) 频率范围: 26~38 GHz;
- 2) 视频信号输出: 差分输出。输出信号如图 1 所示, 其中  $U_{ocm}$  为共模电压<sup>[3]</sup>;
- 3) 灵敏度要求: 差分输出正端与负端的峰峰值  $U_{out+} - U_{out-} = -800$  mV 时, 输入功率  $\leq -57$  dBm;

4) 线性输入 1 dB 压缩点： $P_{-1} \geq -21$  dBm。

## 2 国产 SDLVA 芯片设计指标

### 2.1 切线灵敏度(Tangent Sensitivity, TS)

切线灵敏度<sup>[4]</sup>是指当叠加在输出信号峰值上的白噪声幅度与信号基底噪声幅度相切时对应的输入射频信号功率。当输入信号为方波调制时，切线灵敏度信号如图 2 所示，其单位通常为 dBm 或 dBW。根据测试，国产 SDLVA 芯片的切线灵敏度优于 -49 dBm。

### 2.2 动态范围

检波输出电压与输入射频信号功率的关系如图 3 所示。在小信号输入情况下，检波二极管的检波输出电压与输入射频信号幅度呈平方关系。当信号增大到一定程度时，平方关系逐渐消失，检波二极管进入饱和状态。平方律检波与饱和状态的拐点(A 点)之间的部分，即为检波二极管的动态范围。根据测试，国产 SDLVA 芯片的动态范围为 -48~-5 dBm，如图 4 所示。

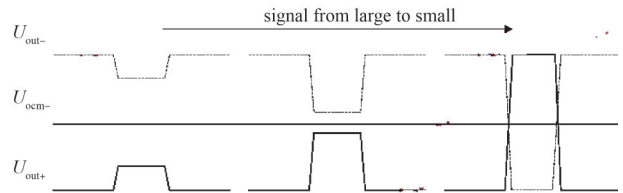


Fig.1 Diagram of output video signal  
图 1 输出视频信号示意图

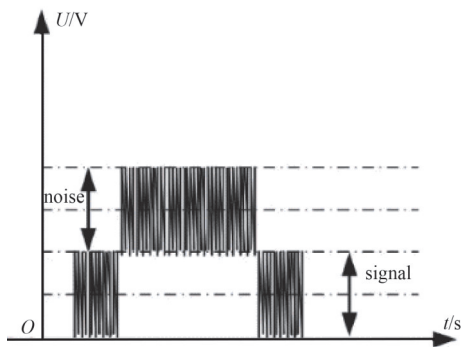


Fig.2 Sketch map of tangent sensitivity  
图 2 切线灵敏度示意图

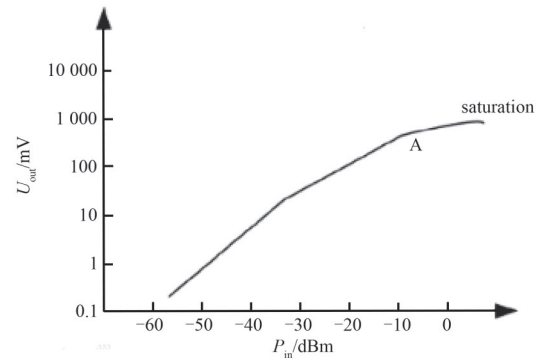


Fig.3 Sketch map of dynamic range  
图 3 动态范围示意图

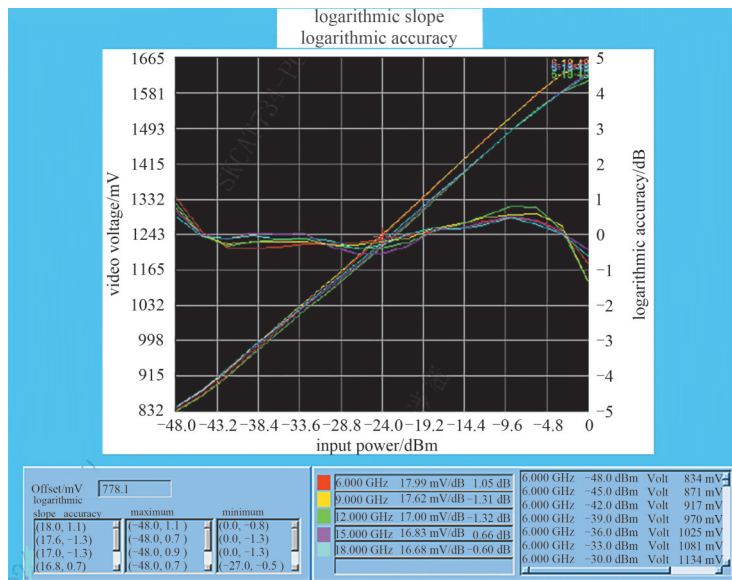


Fig.4 Measured drawing of dynamic range  
图 4 动态范围实测图

### 2.3 其他电特性值

根据器件资料，可知国产 SDLVA 芯片的其他相关参数为：频率范围：0.1~20 GHz；检波范围：-55~+3 dBm；对数视频输出上升时间：5 ns；对数视频输出下降时间：6 ns；工作电流：85 mA@+3.3 V。

### 3 毫米波检波分析及电路设计

由章节 2 可知, 国产 SDLVA 芯片的频率范围为 0.1~23 GHz, 切线灵敏度优于 -49 dBm, 线性动态范围为 -48~-5 dBm。为实现 26~38 GHz 毫米波信号的对数视频检波放大输出, 灵敏度优于 -57 dBm, 射频输入  $P_{-1}$  优于 -21 dBm, 需将频率由 26~38 GHz 搬移到 3~15 GHz, 将线性动态范围搬移到国产 SDLVA 芯片的线性动态范围。针对以上需求, 采用下变频放大电路实现。

#### 3.1 本振电路设计

根据计算, 选择本振信号为 41 GHz。采用微封装锁相环(Phase Locked Loop, PLL)生成 20.5 GHz 信号, 再通过有源二倍频器生成 41 GHz 的方式实现, 具体实现方案如图 5 所示。

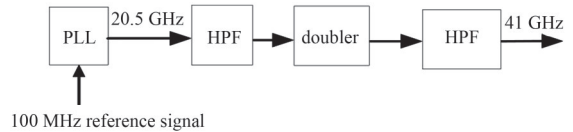


Fig.5 Block diagram of local oscillator circuit scheme  
图 5 本振电路方案框图

20.5 GHz 锁相源除了产生 20.5 GHz 的主信号外, 还会产生 4.1 GHz、8.2 GHz、12.3 GHz、16.4 GHz 等分频信号, 因此在倍频前用高通滤波器(High Pass Filter, HPF)对分频信号进行滤除后再进行二倍频, 倍频产生 41 GHz 后再对不需要的基波 20.5 GHz 进行滤除。

考虑到 20.5 GHz 点频源信号和 41 GHz 本振信号相对于检波信号为强信号, 若信号泄露到检波电路, 会严重影响检波灵敏度。为防止强信号的串扰, 需从射频电路、馈电电路和空间泄露上对 20.5 GHz 点频源信号和 41 GHz 本振信号进行隔离。措施一: 在射频电路上采用高通滤波器对 20.5 GHz 点频源信号进行抑制, 如图 5 所示; 措施二: 采用单独的低压差稳压器对本振电路进行馈电, 避免电路上形成串扰; 措施三: 对本振支路采用隔腔和独立盖板形成全封闭结构, 采用穿墙射频绝缘子输出本振信号驱动混频器, 不会通过空间辐射到检波电路影响检波灵敏度。

#### 3.2 检波射频电路及灵敏度、线性输入 $P_{-1}$ 设计

设计的检波电路方案框图如图 6 所示。在选择射频放大器时, 尽量选择具有低噪声系数和较高增益的单片放大器件。在混频前后分别加入高通滤波器和低通滤波器, 减少不需要的频率对检波器的影响。

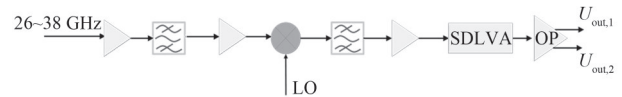


Fig.6 Block diagram of radio frequency circuit scheme  
图 6 射频电路方案框图

通过射频仿真软件, 射频部分指标仿真如图 7 所示。通过仿真可知, 增益为 16.7 dB, 噪声系数为 6.74 dB, 射频输出  $P_{-1}$  为 1.19 dBm。

##### 3.2.1 灵敏度指标分析

根据切线灵敏度计算公式<sup>[5]</sup>:

$$T_s = -114 + 10 \log F_T + 10 \log \left( 6.31 B_V + 2.5 \sqrt{2 B_R B_V - B_V^2} \right) \quad (1)$$

式中:  $F_T$  为噪声系数;  $B_R$  为射频带宽, 单位为 MHz;  $B_V$  为视频带宽, 单位为 MHz。

本文取  $B_R=22\ 000$  MHz,  $B_V=30$  MHz, 将参数代入式(1), 得到切线灵敏度为 -69.5 dBm。

根据技术要求: 对数斜率(35±5) mV/dB, 以及无射频信号输入时,  $U_{out+} - U_{out-} = -1\ 000$  mV, 可计算当输出正端与负端的峰峰值为  $U_{out+} - U_{out-} = -800$  mV 时, 灵敏度为:  $-69.5 - [(-1000) - (-800)] \div 35 = -63.8$  dBm, 优于技术要求: 差分输出正端与负端的峰峰值  $U_{out+} - U_{out-} = -800$  mV 时, 输入功率 ≤ -57 dBm。

##### 3.2.2 线性输入 $P_{-1}$ 指标分析

根据图 4 可知, 国产 SDLVA 芯片的输入  $P_{-1}$  为 0 dBm, 根据图 6 的仿真结果可知, 检波射频电路的输入  $P_{-1}$  为:  $1.19 - 16.7 = -15.5$  dBm。

通过以上分析, 可知射频输入  $P_{-1}$  和检波输入  $P_{-1}$  均优于技术要求: 线性输入  $P_{-1}$ : ≥ -21 dBm。

#### 3.3 视频放大电路

设计的视频放大电路如图 8 所示。采用多级运算放大器实现运算放大及直流漂移补偿功能。共模电压和差模电压可通过调整差分运算放大器实现。对数斜率是通过调整运算放大器的放大倍数来实现。通过反向运算放大器实现直流漂移补偿功能。

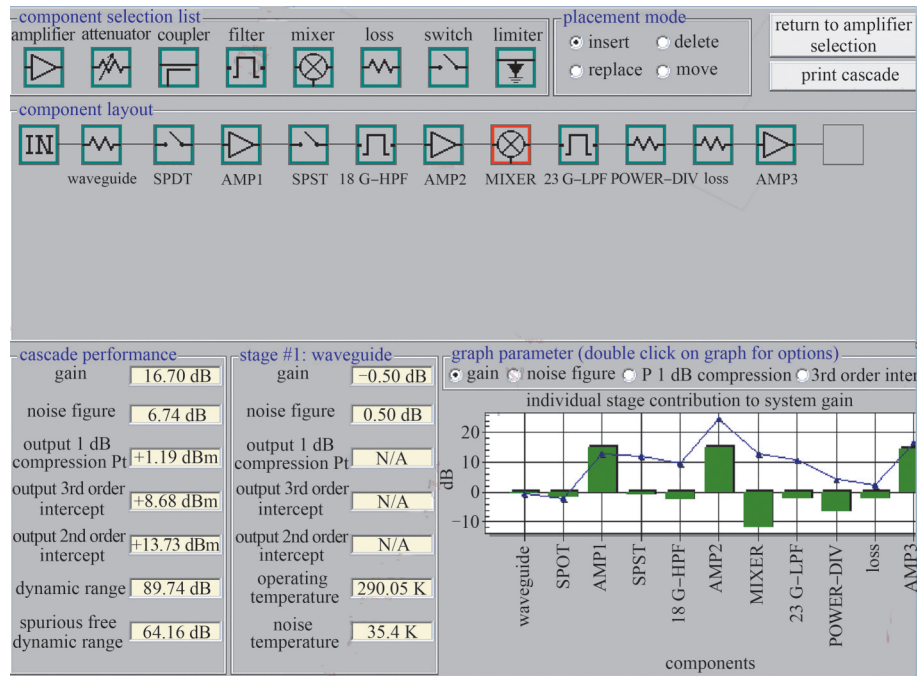


Fig.7 Block diagram of radio frequency circuit simulation

图7 射频电路仿真框图

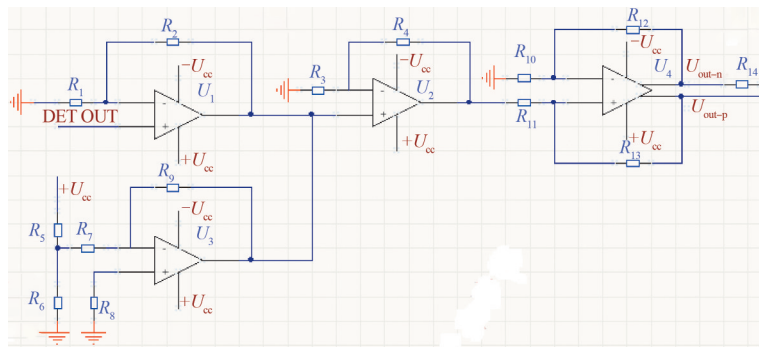


Fig.8 Block diagram of radio frequency circuit simulation

图8 视频放大原理框图

### 4 测试验证

产品测试过程中需对各个指标进行逐一测试验证，灵敏度和线性输入  $P_1$  在前期都进行了仿真计算，但在实际调试过程中，发现灵敏度和线性输入  $P_1$  与设计指标还是有一定差距。

灵敏度主要受本振支路大信号泄露和串扰影响，虽然在结构设计中对本振支路进行了全封闭设计，且供电采用了独立设计，但仍避免不了本振支路大信号通过供电电路串扰到背面的印制板，并通过空间辐射影响灵敏度。对于这类电磁兼容问题，可通过粘贴吸收材料以及信号泄露处堵导电胶的方法来解决。

在毫米波频段，装配工艺对链路增益影响较大，导致链路增益有波动。增益过高时，会导致输入  $P_1$  压缩；增益过低时，会导致灵敏度不够。可通过压接金带进行电路匹配将增益值调整到合适数值，同时满足灵敏度和输入  $P_1$  要求。

经过调试过程中的对症处理，调试后的指标满足技术要求。对数斜率、对数精确度及无信号输入时的直流漂移如图 9 所示，线性输入  $P_1$  如图 10 所示。

本次毫米波宽带检波器在经过认真分析、论证、实施后，调试结果与设计吻合，满足系统对宽带检波器的指标要求。

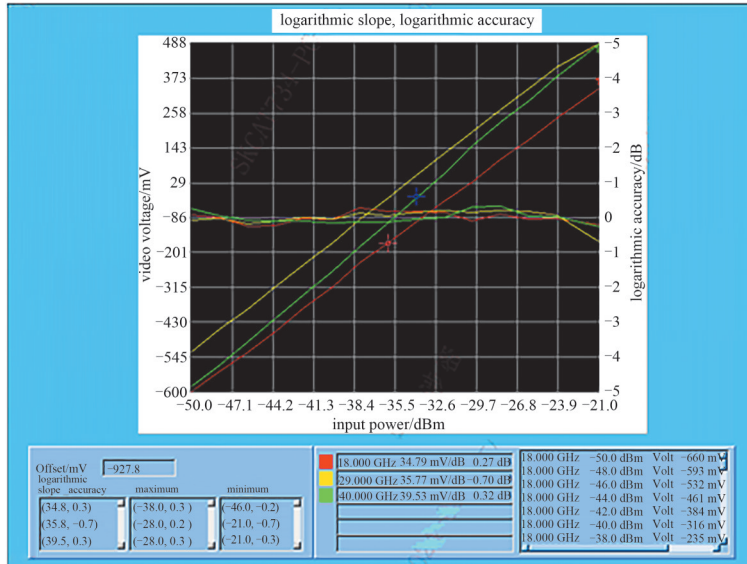


Fig.9 Log slope,Log accuracy,DC offset test data  
图9 对数斜率、对数精确度、直流漂移测试数据

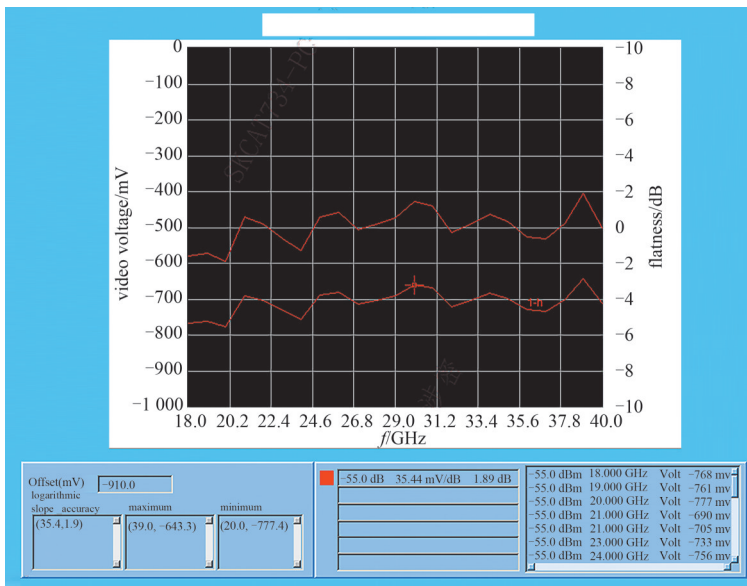


Fig.10 Test block diagram of linear input  $P_{11}$   
图 10 线性输入  $P_{11}$  测试数据

### 5 结论

本文给出了一种毫米波宽带检波的设计实现方法，采用下变频模式将毫米波频率搬移到较低频率再进行检波。采用变频模式的检波方法需引入本振信号，还需考虑到杂散抑制、电磁兼容等问题，虽然比直检模式<sup>[6-7]</sup>在电路上要复杂些，但可以解决毫米波宽带直检模式下的无国产化可替代器件带来的问题。

该毫米波宽带检波器目前已用于某接收系统中，其性能亦可拓展用于各类电子装备的检波。

### 参考文献：

[1] 薛磊,龚小立,何伟,等. 毫米波检波器小信号检波特性分析[J]. 电声技术, 2022,46(10):91-93,97. (XUE Lei,GONG Xiaoli,HE Wei,et al. Characteristic analysis of small signal detection of millimeter wave detector[J]. Audio Engineering, 2022,46(10):91-93,97.) doi:10.16311/j.audioe.2022.10.026.