



全差分射频宽带放大系统的设计与实现

杨光义, 羊硕雄, 李新阳, 李文博

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘要: 以微处理器 MSP430F6638 为控制核心, 设计实现了一套全差分射频宽带数控增益放大系统。系统包括输入调理、可控增益放大、输出、控制和系统供电 5 大模块, 实现 30~240 MHz 宽带放大。系统进行严格的阻抗控制与屏蔽处理, 有效降低信号反射与环境噪声的干扰, 在 40~200 MHz 内起伏小于 2 dB; 在 20 MHz 和 270 MHz 时系统增益下降超过 30 dB; 0~64 dB 增益范围内任意步进可调, 最小步进 1 dB。分析了全差分放大器的 4 种电路形式, 介绍了几种常用滤波器的优缺点, 给出了核心模块的具体电路图, 并结合实验数据对系统性能进行完整分析, 为学科竞赛和工程实践等多种场合应用提供了方便。

关键词: 射频; 宽带; 可控增益放大; 全差分; 滤波器

中图分类号: TN761.2; G642.423

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20200407](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20200407)

Design and Implementation of a Fully Differential RF Wideband Amplifier System

YANG Guangyi, YANG Shuoxiong, LI Xinyang, LI Wenbo

(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Taking the microprocessor MSP430F6638 as the control core, a set of fully differential RF wideband numerical control gain amplification system is designed and implemented. The system includes five modules, including input conditioning, programmable gain amplification, output, control and system power supply, which is able to achieve wideband amplification in the range of 30 to 240 MHz. The system is subjected to strict impedance control and shielding to effectively reduce the interference of signal reflection and environmental noise, and the fluctuation is less than 2 dB in 40 to 200 MHz. The system gain drops by more than 30 dB at 20 MHz and 270 MHz, and any step can be adjusted within the gain range of 0 to 64 dB, with a minimum step of 1 dB. The paper analyzes the four circuit types of the fully differential amplifier, introduces the advantages and disadvantages of several commonly used filters, and renders the specific circuit diagram of the core module. The experimental data is combined to make a complete analysis of system performance, providing convenience for application in various occasions such as subject competition and engineering practice.

Key words: radio frequency; wideband; programmable gain amplification; fully differential; filter

随着移动互联时代的来临, 射频宽带放大器在无线通信系统中的应用越来越广泛, 日渐成为影响整个通信系统质量的重要环节^[1-3]。以接收机系统为例, 射频前端往往面临信号小、噪声强、频率高与变化幅度大的严峻挑战, 如何实现射频小信号的宽带放大和频带内增益起伏控制是当前的一个研究难题^[4-6]。为此, 本文设计实现了一套全差分数控增益射频放大系统, 将全差分放大器 LMH5401 与数控可变增益放大器 LMH6401 级联,

完成宽带放大的同时, 实现频带内增益数控可调。

1 系统相关原理

1.1 全差分放大器驱动原理

在相同电源电压下, 差分信号可以提供两倍于单端信号的幅度, 以及更好的线性度和信噪比性能。因此在高频电路中, 特别是小信号、低信噪比的场合, 为了实现更好的性能, 往往需要引入差分电路^[7-8]。

收稿日期: 2020-09-02; 修回日期: 2021-03-22

基金项目: 武汉大学教学改革建设项目(2019JG074, 413200054); 武汉大学设备处实验技术项目(WHU-2019-SYJS-05)。

作者简介: 杨光义(1983-), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事高频电子线路教学和图像处理等研究。

根据输入信号的不同,全差分放大器可以分为单端或差分信号驱动形式。另外,考虑阻抗匹配,全差分放大器又可以分为有端接和无端接两

种形式。表 1 给出了 4 种全差分放大器的情况,包括电路原理图、增益与反馈电阻计算公式以及应用场景。详细的分析和讨论,可以参阅文献 [9]。

表 1 全差分放大器的 4 种电路形式

	无端接	有端接
原理图		
计算公式	$G = \frac{R_{F1}}{R_{G1} + R_S/2}, R_{F1} = R_{F2} = G \left(R_{G1} + \frac{R_S}{2} \right)$	$G = \frac{R_{F1}}{\frac{R_{G1} + R_S}{2}}, R_{F1} = R_{F2} = G \cdot R_{G1}$
应用场景	针对低阻抗信号源,信号源与驱动器直接连接距离较短	差分放大器前级为屏蔽线,此时必须考虑屏蔽线的特征阻抗
原理图		
计算公式	$G = \frac{R_{F1}}{R_{G1} + R_S}, R_{F1} = R_{F2} = G (R_{G1} + R_S)$	$G = \left[\frac{2R_T}{R_T + R_S} \right] \left[\frac{R_{F2}}{R_{G2}} \right], R_{F2} = R_{F1} = G \left[\frac{R_{G2} (R_S + R_T)}{2R_T} \right]$
应用场景	可以提供一种有效的途径将单端信号转换成差分信号,如作为差分ADC的前级驱动器	单端信号驱动一条同轴电缆,此时必须考虑屏蔽线的特征阻抗

以单端输入无端接为例,如图 1 所示,运放采用单电源 5 V 供电,共模电压设置为 2.5 V,输入信号为单端双极性信号,增益设置为 1。

从图 1 可以看出,差分放大器将单端信号转换成相位相差 180° 的差分信号,输出共模电压为 2.5 V。

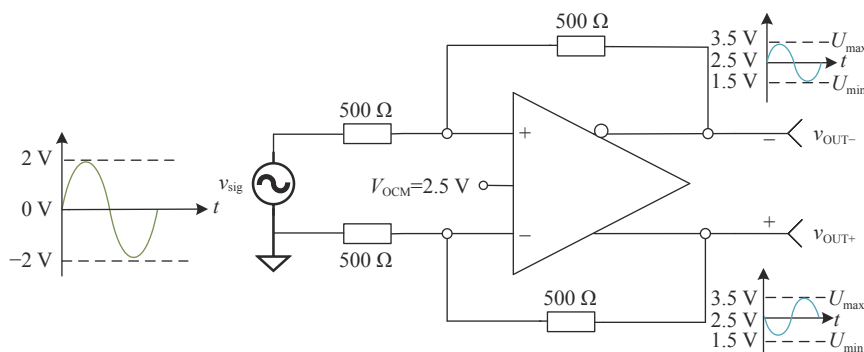


图 1 单端-差分转换电路

1.2 射频滤波器

由于有源器件受到自身带宽限制,射频滤波器往往采用无源滤波器实现,主要完成阻抗匹配和滤波的功能。根据传递函数的不同,射频滤波

器主要分为巴特沃斯、切比雪夫 I 型、切比雪夫 II 型、贝塞尔、高斯和椭圆等多种形式^[10]。

以截止频率为 200 MHz 的 7 阶低通滤波器为例,各滤波器的 S21 响应曲线及优缺点汇总如表 2

所示(图中纵坐标：幅频响应/dB；横坐标： f/Hz)。可以看出，切比雪夫 I 型滤波器具有良好的带内

平坦度，阻带内滚降迅速且无均衡纹波，所以本文选择切比雪夫 I 型滤波器。

表 2 200 MHz 的 7 阶低通滤波器特性汇总表

滤波器	S21响应曲线	优点	缺点
巴特沃斯滤波器		通带内的平坦度非常好	阻带内缓慢滚降
切比雪夫 I 型滤波器		阻带内滚降迅速；阻带内无均衡纹波	通带内有均衡纹波
切比雪夫 II 型滤波器		通带内无纹波	滚降不是非常快；阻带内有均衡纹波
贝塞尔滤波器		最平坦的群相位延迟	阻带滚降非常缓慢
高斯滤波器		通带内平坦度较好	阻带内滚降非常缓慢
椭圆滤波器		接近阻带时滚降速度非常迅速	通/阻带中均有均衡纹波，影响性能

2 系统方案设计

2.1 系统组成

增益可控射频放大系统主要由信号调理模块、数控增益放大模块、输出模块、系统供电模块和控制模块 5 部分组成，系统框图如图 2 所示。

图 2 中，信号调理模块由 7 阶切比雪夫无源低通滤波器和全差分放大器 LMH5401 组成。7 阶切比雪夫无源低通滤波器用于滤除输入信号的高

频干扰噪声，同时起到阻抗匹配的作用。差分放大器 LMH5401 将单端信号转换为差分信号，以提高系统的信噪比和抗干扰能力；数控增益放大模块包括两级数控增益放大器 LMH6401 和一级全差分放大器 LMH5401，用于放大前级差分信号，得到增益可控的电压信号；输出模块由巴伦变压器 ADT2-1T+、11 阶切比雪夫带通滤波器和功率放大器 RF3827 构成。其中，巴伦变压器 ADT2-1T+将数控放大器放大后的差分信号转换成单端信号，

经 11 阶切比雪夫无源带通滤波后, 通过功率放大器 RF3827 放大, 完成信号输出; 控制模块由微处理器 MSP430F6638、按键和 OLED 显示屏组成。微处理器 MSP430F6638 通过 SPI 总线与数控增益放大器 LMH6401 通信, 实现增益可控。用户通过

按键设置系统的增益, OLED 显示屏实时显示放大倍数等系统状态信息; 系统供电模块由线性稳压器 ADM7150、TPS7A4533 和 TPS7A4501 组成, 分别提供 +5 V、+3.3 V 和 +8 V 的直流电压, 保障系统稳定工作。

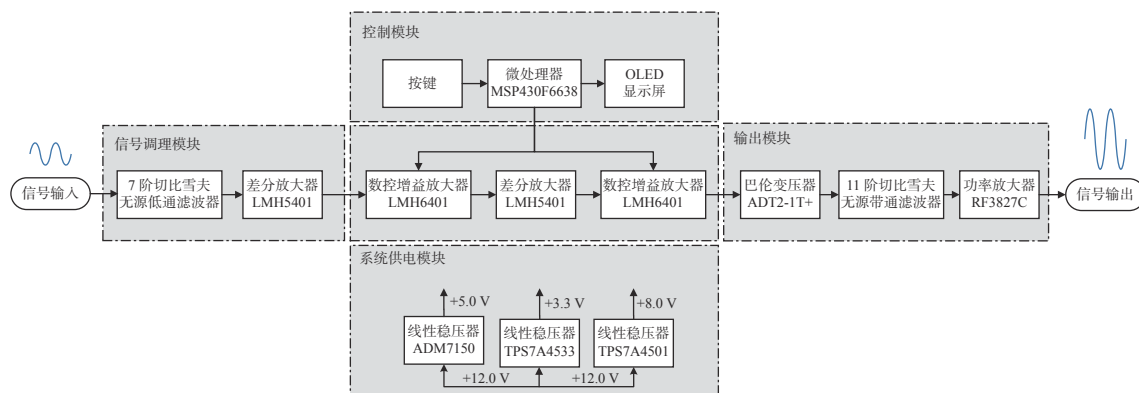


图 2 系统组成框图

2.2 系统增益与平坦度设计

为了在足够宽的频带内有足够大的增益可调范围, 同时保证系统的稳定性, 系统采用多级放大器级联, 各级增益分配如图 3 所示。

图 3 中, 前级差分放大器 LMH5401 增益设置为 12 dB, 每级数控增益放大器 LMH6401 的增益变化范围为 -6 ~ 26 dB, 巴伦变压器 ADT2-1T+ 插入损耗为 -6 dB, 射频功率放大器 RF3827 提供 18 dB 固定增益。应当注意的是, 系统中间有两级差分线性阻抗匹配, 共造成 -12 dB 的衰减, 同时 300 MHz 低通滤波器和 30~240 MHz 带通滤波器

共引入 -12 dB 的衰减。因此, 理论上系统可控增益范围为 0~64 dB。

工程应用中, 系统对带内波动有较高要求, 需在设计时保证每个模块带内波动尽量小, 且模块间要做到严格的阻抗匹配^[1]。根据官方提供的数据手册, LMH6401 和 LMH5401 在 500 MHz 内增益起伏均小于 0.5 dB; 射频功率放大器 RF3827 在 500 MHz 内增益波动不超过 1 dB; 300 MHz 低通滤波器和 30~240 MHz 带通滤波器带内波动均小于 0.2 dB。因此, 理论上系统在 30~240 MHz 有良好的带内平坦度。

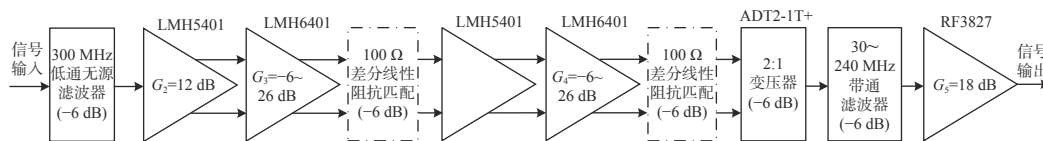


图 3 系统各级增益分配

3 系统实现

由于本文的重难点在于射频信号处理, 限于论文篇幅, 本文仅对信号调理模块、数控增益放大模块和信号输出模块展开。

3.1 信号调理模块

信号调理模块由 7 阶切比雪夫无源低通滤波器和全差分放大器 LMH5401 组成。其中, 全差分放大器 LMH5401 将单端信号转换为差分信号。通过选择适当的反馈电阻 R_F (R_4/R_9)、增益

设置电阻 R_G (R_5/R_7) 和终端电阻 R_T (R_3/R_{10}) 设置增益, 同时完成 50 Ω 阻抗匹配, 具体电路如图 4 所示。

图 4 中, LMH5401 采用单电源 5 V 供电, 外接 2.5 V 共模偏置电压, 放大倍数设置为 4 V/V (12 dB)。为了与下一级的数控增益放大模块匹配, LMH5401 与 LMH6401 设置相同的共模偏置电压 (2.5 V), 保证输出信号动态范围最大的同时, 使系统的输出共模补偿误差最小化, 并抑制二次谐波失真。

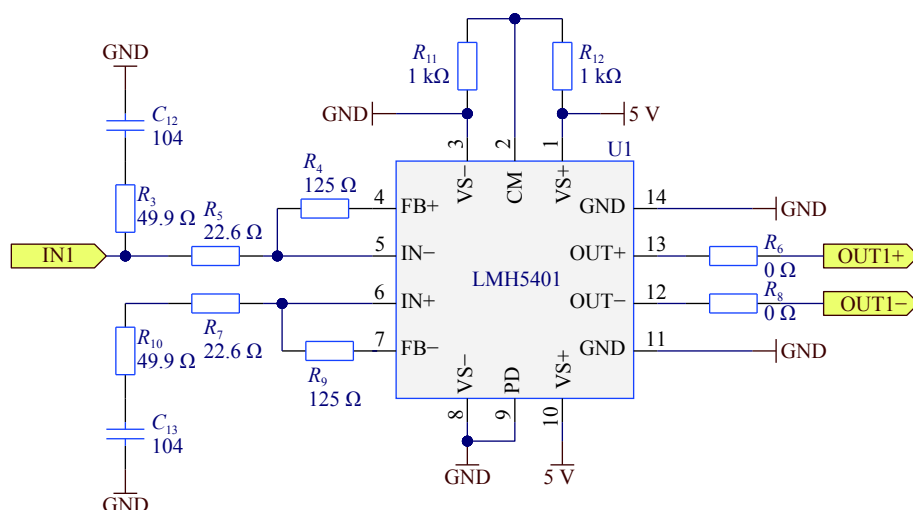


图4 前级差分放大电路

3.2 数控增益放大模块

数控增益放大器 LMH6401 是一种可变增益射频宽带放大器, 增益范围从 $-6\sim 26$ dB 步进可调, 最小步进 1 dB, 增益控制通过 SPI 总线与微处理器 MSP430F6638 通信实现。为了获得 64 dB 的高增益,

系统采用两级 LMH6401 进行级联, 两级 LMH6401 之间使用一级全差分放大器 LMH5401 作为缓冲器, 补偿阻抗匹配引起的衰减。图 5 为一级数控增益放大器 LMH6401 的电路图, 其中 SDI、SDO、PD1、CS 和 SCLK 均与微处理器 MSP430F6638 相连。

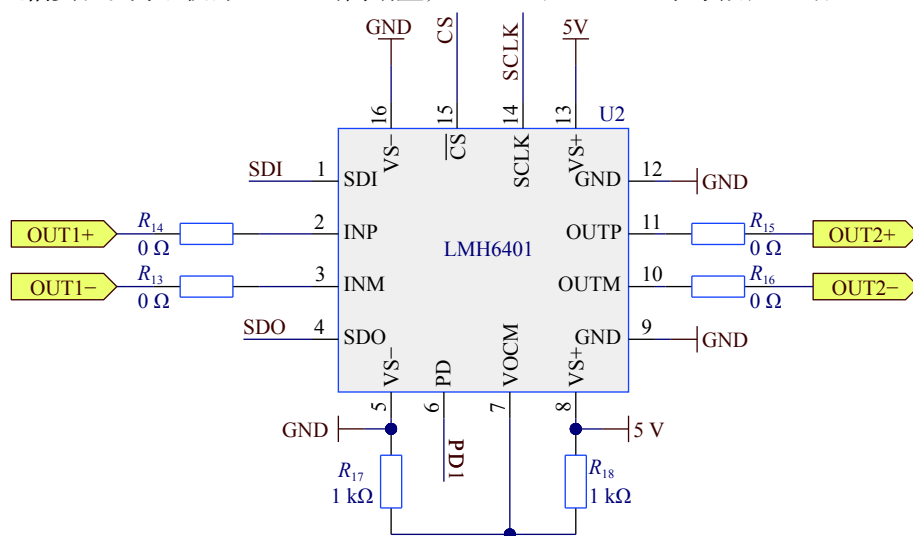


图5 数控增益放大电路

3.3 信号输出模块

信号输出模块由巴伦变压器 ADT2-1T+、11 阶切比雪夫无源带通滤波器以及低噪声射频功率放大器 RF3827 组成。巴伦变压器 ADT2-1T+ 用于将数控增益放大模块放大后的差分信号转换成单端信号, 实现信号的“零”噪声转换, 减小信号反射, 提高信噪比; 11 阶切比雪夫无源带通滤波器用于对转换后的单端信号滤波, 进一步降低带外噪声, 最大程度保证系统工作的稳定性; 功率放大器 RF3827 对滤波后的信号进一步放大, 从而得到大电压、大功率的输出信号。

滤波器设计时, 可以利用 Filter Solution 滤波器计算工具^[12]完成。设置通带范围为 $20\sim 240$ MHz, 特性阻抗 $Z_0 = 50\ \Omega$, 滤波器阶数 $n = 11$, 通带纹波为 0.2 dB, 输入输出阻抗均为 $50\ \Omega$, 同时结合电感和电容的标称值, 得到: $L_1 = 180\text{ nH}$, $L_2 = 55\text{ nH}$, $L_3 = 100\text{ nH}$, $L_4 = 56\text{ nH}$, $L_5 = 100\text{ nH}$, $L_6 = 56\text{ nH}$, $L_7 = 100\text{ nH}$, $L_8 = 56\text{ nH}$, $L_9 = 100\text{ nH}$, $L_{10} = 56\text{ nH}$, $L_{11} = 180\text{ nH}$, $C_1 = 22\text{ pF}$, $C_2 = 68\text{ pF}$, $C_3 = 36\text{ pF}$, $C_4 = 56\text{ pF}$, $C_5 = 36\text{ pF}$, $C_6 = 56\text{ pF}$, $C_7 = 36\text{ pF}$, $C_8 = 56\text{ pF}$, $C_9 = 36\text{ pF}$, $C_{10} = 68\text{ pF}$, $C_{11} = 22\text{ pF}$ 。具体电路如图 6 所示。

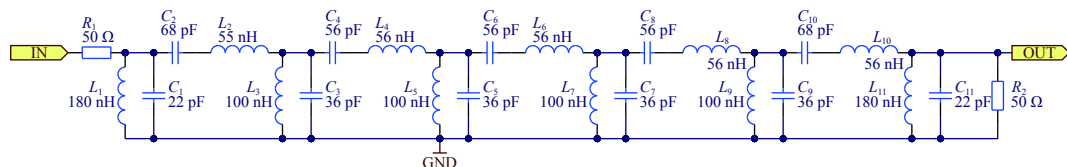


图 6 切比雪夫 I 型 11 阶无源带通滤波器

3.4 系统抗干扰

为了保障射频系统的可靠性,充分发挥其应有的性能,在进行系统设计时,除了合理的电路设计和器件选型外,还应该将阻抗匹配的思想贯穿系统设计的始终^[13]。尤其是印制电路板的设计,除了需要综合考虑布局布线,还应该做严格的阻抗控制,以保障整个系统严格匹配。

另外,由于射频系统的工作频率较高,很容易受到外界信号的干扰,严重时甚至造成系统无法正常工作,因此,射频电路的屏蔽设计尤为关键^[14-15]。为此,本系统对每个模块使用铁盒进行屏蔽处理,并对整个系统使用铜皮纸进行整体屏蔽,有效减少各个模块之间串扰的同时,最大程度隔离环境噪声。

4 系统测试

系统测试在实验室环境下进行,测试仪器清单如表 3 所示。

表 3 测试仪器清单

序号	仪器	型号	品牌	参数
1	直流稳压电源	DP832	Rigol	32V3A/双路
2	射频信号源	N9310A	Keysight	9 kHz~3 GHz
3	数字示波器	MDO3032	Tektronix	350 MHz/双路
4	矢量网络分析仪	E5061B	Agilent	100 kHz~3 GHz

4.1 系统可控增益范围测试

利用信号源产生 $v_{in} = 20 \text{ mV}_{\text{rms}}/f_{in} = 100 \text{ MHz}$ 的正弦波作为系统输入,通过微处理器 MSP430F6638 调节系统增益在 0~64 dB 范围内以 4 dB 步进,同时用示波器观察输出电压,记录在表 4 中。根据表 4,绘制“预置增益-实测增益-增益误差”曲线,如图 7 所示。

从图 7 可以看出,系统增益在 0~64 dB 内连续可调,可控范围大,带载能力强;同时可以看出,系统增益误差小,在不同的预置增益下,系统最大增益误差为 1.38 dB,说明系统的增益输出精度很高。

表 4 增益步进测试表($f = 100 \text{ MHz}$)

预置增益 G_{set}/dB	输出电压 $v_{\text{out}}/\text{mV}_{\text{rms}}$	实际增益 $G_{\text{real}}/\text{dB}$	误差 $ G_{\text{real}} - G_{\text{set}} /\text{dB}$	预置增益 G_{set}/dB	输出电压 $v_{\text{out}}/\text{mV}_{\text{rms}}$	实际增益 $G_{\text{real}}/\text{dB}$	误差 $ G_{\text{real}} - G_{\text{set}} /\text{dB}$
0	10.9	0.75	0.75	36	718	37.1	1.10
4	16.9	4.56	0.56	40	1026	41.1	1.09
8	27.3	8.71	0.71	44	1299	45.1	1.08
12	43.7	12.80	0.79	48	1475	49.4	1.38
16	68.3	16.70	0.67	52	1636	53.1	1.13
20	109.0	20.80	0.75	56	1786	57.3	1.30
24	176.0	24.90	0.89	60	1889	61.3	1.31
28	278.0	28.90	0.88	64	1936	65.3	1.26
32	440.0	32.90	0.86				

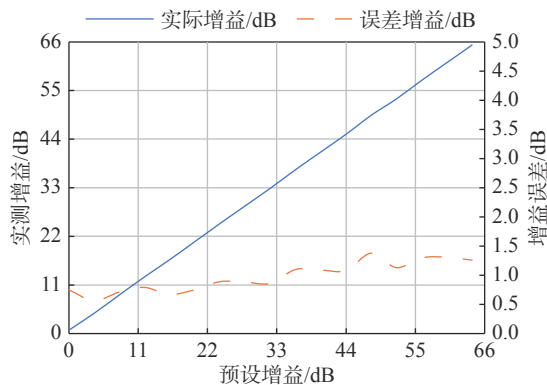


图 7 预置增益-实测增益-增益误差曲线

4.2 通频带及通带平坦度测试

矢量网络分析仪输出端通过 40 dB 衰减器后连接到系统输入端,将系统输出端连接到矢量网络分析仪测量的信号端。设置矢量网络分析仪输出信号幅度为 10 mV,扫频范围为 10~300 MHz,系统增益设置为 52 dB,记录测量数据如表 5 所示。网络分析仪实测的系统幅频特性图如图 8 所示。

分析图 8 可知,系统在 40~200 MHz 的频带内,增益达到 52 dB 以上;在 50~160 MHz 频带内

增益起伏小于 1 dB; 在 40~200 MHz 频带内增益起伏小于 2 dB; 在 30~240 MHz 频带内增益起伏小于 3 dB, 反映了系统良好的性能。且当输入信

号频率 $f \leq 20$ MHz 或 $f \geq 270$ MHz 时, 系统增益下降超过 30 dB, 其中频率在 20 MHz 时系统增益衰减达到 -72 dB, 滤波效果明显。

表 5 通频带及通带平坦度测试表

序号	f/MHz	v_{out}/V	G/dB	序号	f/MHz	v_{out}/V	G/dB
1	20	0.017	-20.879	8	140	2.520	52.343
2	40	2.430	51.833	9	160	2.420	51.805
3	50	2.540	52.512	10	170	2.490	52.237
4	60	2.520	52.305	11	180	2.380	51.108
5	80	2.600	53.105	12	190	2.430	51.832
6	100	2.590	53.018	13	200	2.280	50.232
7	120	2.560	52.656	14	270	0.027	20.387

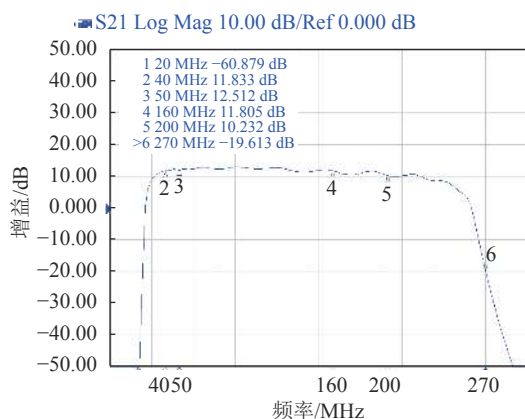


图 8 系统幅频特性图

5 结束语

本文设计了一套全差分可控增益射频宽带放大系统, 通过 4 种电路形式分析了全差分运算放大器驱动原理, 以截止频率为 200 MHz 的 7 阶低通滤波器为例介绍了几种常用滤波器的优缺点和应用场合, 给出了完整的设计方案和关键模块的具体电路图。实验表明, 系统能够在 30~240 MHz 宽频带范围内实现可控增益调节, 最大增益 64 dB, 具有精度高、带载能力强和稳定性好等特点。

参考文献

- [1] 谢军, 盛庆华, 毛礼建. 射频宽带放大器的增益控制设计与研究[J]. 现代电子技术, 2015, 38(6): 136-138.
- [2] 马延军, 朱代先, 庞立华, 等. 射频宽带放大器设计在电子竞赛指导中的应用[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(10): 94-97.
- [3] 王国强, 王小峰, 蒲颜, 等. 一种高线性度宽带射频

放大器[J]. 微电子学, 2018, 48(276): 38-41.

- [4] 马大康, 杜力, 裴玉伟, 等. 高输出电压的宽带程控增益放大系统[J]. 电子器件, 2011, 34(1): 74-76.
- [5] 梁源. 无线通信射频接收系统研究[J]. 电子测试, 2019(9): 74-75.
- [6] 谷务成. 超宽带数控可变增益放大器的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [7] Analog Devices. Differential drivers for high speed ADCs overview[EB/OL]. (2002-10-01)[2021-11-11]. <http://www.mouser.com/pdfdocs/src-tutorials/Differential-Drivers-for-High-Speed-ADCs.pdf>.
- [8] Analog Devices. 差分驱动器分析[EB/OL]. (2002-10-01)[2021-11-11]. https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-076_cn.pdf.
- [9] CHEN M. 通信系统中接收链的差分滤波器设计[EB/OL]. (2015-07-01)[2021-11-11]. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1364_cn.pdf.
- [10] WILLIAMS A B, TAYLOR F J. 电子滤波器设计[M]. 宁彦卿, 译. 北京: 科学出版社, 2008.
- [11] 朱进, 尹园威, 刘超. 射频电路匹配网络的分析与设计[J]. 信息技术, 2011(8): 98-101.
- [12] Ansys Nuhertz. Filter solutions[EB/OL]. [2021-11-11]. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-nuhertz-filtersolutions#tabs2-045d4b2b79-tab-1>.
- [13] 杨光义, 魏天奇, 李杰潘, 等. 全差分可控增益射频宽带放大系统[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(9): 116-121.
- [14] 张吉庆. 射频电路抗干扰设计方法研究[J]. 数字通信世界, 2019(4): 25.
- [15] 聂剑红, 刘骥, 魏利军. EMI无源滤波器高频特性及其改善方法的研究[J]. 电力电子技术, 2007(12): 39-41.

编辑 张俊