



# 增益可控射频放大器

西安电子科技大学

傅丰林

二〇一五年十一月七日



# 一、题目分析

## ●题目：增益可控射频放大器

### 一、任务

设计并制作一个增益可控射频放大器。

### 二、要求

#### 1. 基本要求

(1) 放大器的电压增益 $A_v \geq 40\text{dB}$ ，输入电压有效值 $V_i \leq 20\text{mV}$ ，其输入阻抗、输出阻抗均为 $50\Omega$ ，负载电阻 $50\Omega$ ，且输出电压有效值 $V_o \geq 2\text{V}$ ，波形无明显失真；



# 一、题目分析

(2) 在**75MHz~108MHz**频率范围内增益波动不大于2dB;

(3) -3dB的**通频带**不窄于**60MHz~130MHz**,  
即 $f_L \leq 60\text{MHz}$ 、 $f_H \geq 130\text{MHz}$ ;

(4) 实现 $A_V$ 增益步进控制, 增益控制范围为**12dB~40dB**, 增益控制步长为4dB, 增益绝对误差不大于**2dB**, 并能显示设定的增益值。

## 2. 发挥部分

(1) 放大器的电压增益 **$A_V \geq 52\text{dB}$** , 增益控制扩



# 一、题目分析

展至**52dB**，增益控制步长不变，输入电压有效值  $V_i \leq 5\text{mV}$ ，其输入阻抗、输出阻抗均为  $50\Omega$ ，且输出电压有效值  $V_o \geq 2\text{V}$ ，波形无明显失真；

(2) 在**50MHz~160MHz**频率范围内增益波动不大于**2dB**；

(3)  $-3\text{dB}$ 的**通频带**不窄于**40MHz~200MHz**，即  $f_L \leq 40\text{MHz}$  和  $f_H \geq 200\text{MHz}$ ；

(4) 电压增益  $A_v \geq 52\text{dB}$ ，当输入信号频率  $f \leq 20\text{MHz}$  或输入信号频率  $f \geq 270\text{MHz}$  时，实测电压增益  $A_v$  均**不大于20dB**。



# 一、题目分析

## ● 考点分析

(1) 频带宽200MHz，频率提高，测试频率

$$f_{\max}=270\text{MHz};$$

(2) 增益高， $G_{\max}=60\text{dB}$ ;

(3) 输入信号动态范围大： $V_{\text{imax}}=20\text{mV}$ ;

(4) 带外衰减快，滤波器设计要求高;

(5) 输出功率 $P_o=80\text{mW}$ ;

(6) 单一电源供电;

(7) 工艺。



# 一、题目分析

## ●与2013年D题射频宽带放大器比较

### 一、任务

设计并制作一个射频宽带放大器。

### 二、要求

#### 1. 基本要求

(1) 电压增益 $A_v \geq 20\text{dB}$ ，输入电压有效值 $V_i \leq 20\text{mV}$ 。

$A_v$ 在 $0 \sim 20\text{dB}$ 范围内可调。

(2) 最大输出正弦波电压有效值 $V_o \geq 200\text{mV}$ ,



# 一、题目分析

输出信号波形无明显失真。

(3) 放大器 $BW$ -3dB的下限频率 $f_L \leq 0.3\text{MHz}$ ，上限频率 $f_H \geq 20\text{MHz}$ ，并要求在 $1\text{MHz} \sim 15\text{MHz}$ 频带内增益起伏 $\leq 1\text{dB}$ 。

(4) 放大器的输入阻抗 $=50\Omega$ ，输出阻抗 $=50\Omega$ 。

## 2. 发挥部分

(1) 电压增益 $A_v \geq 60\text{dB}$ ，输入电压有效值 $V_i \leq 1\text{mV}$ 。  
 $A_v$ 在 $0 \sim 60\text{dB}$ 范围内可调。



# 一、题目分析

- (2) 在 $A_v \geq 60\text{dB}$ 时，输出端噪声电压的峰峰值 $V_{oNpp} \leq 100\text{mV}$ 。
- (3) 放大器 $BW-3\text{dB}$ 的下限频率 $f_L \leq 0.3\text{MHz}$ ，上限频率 $f_H \geq 100\text{MHz}$ ，并要求在 $1\text{MHz} \sim 80\text{MHz}$ 频带内增益起伏 $\leq 1\text{dB}$ 。该项目要求在 $A_v \geq 60\text{dB}$ （或可达到的最高电压增益点），最大输出正弦波电压有效值 $V_o \geq 1\text{V}$ ，输出信号波形无明显失真条件下测试。
- (4) 最大输出正弦波电压有效值 $V_o \geq 1\text{V}$ ，输出信号波形无明显失真。





# 一、题目分析

(5) 其他（例如进一步提高放大器的增益、带宽等）。

**主要不同点：频带宽、频率提高，输出电压提高，带外衰减要求快，增益程控。**

射频放大器频率特性示意图如图1所示。

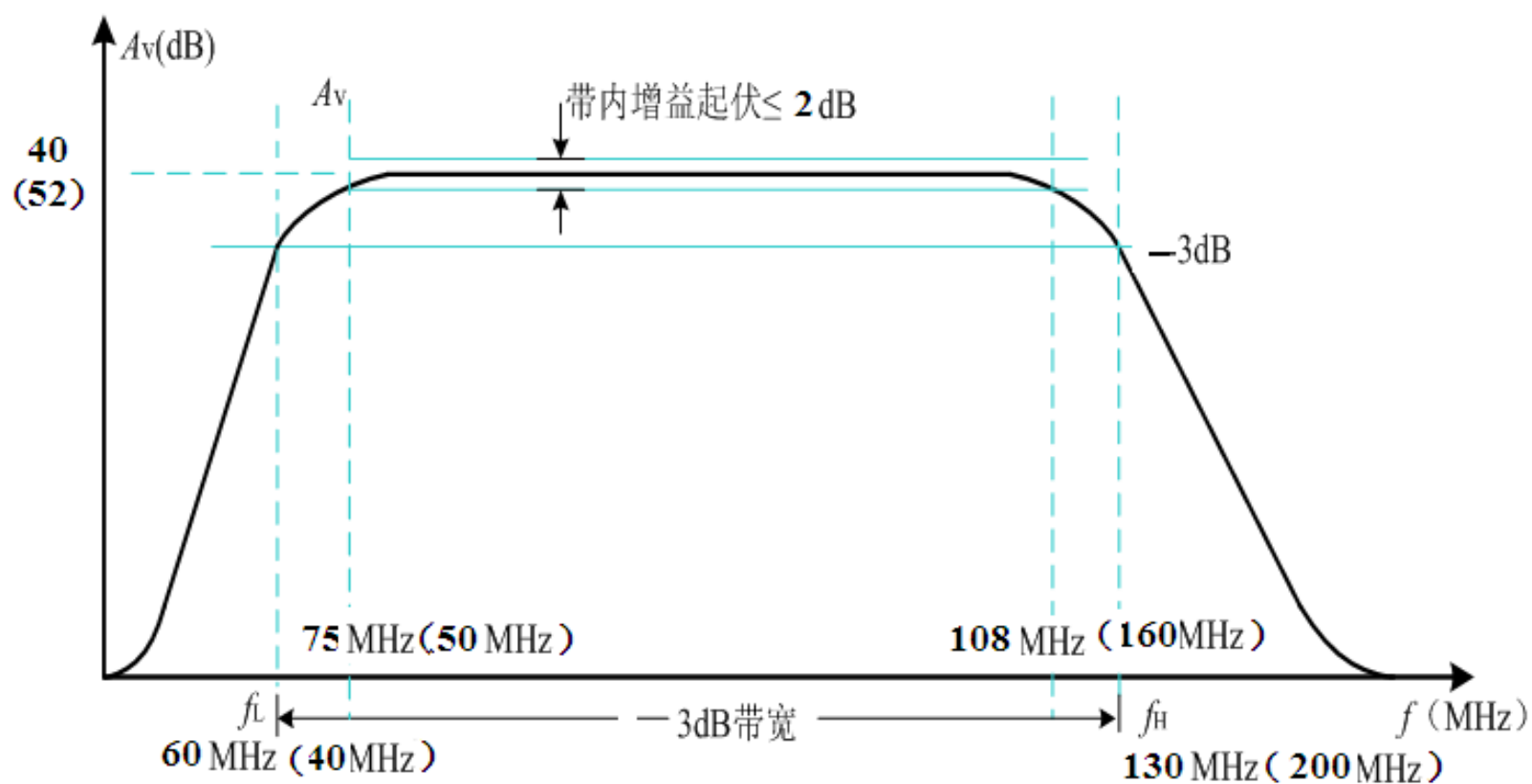


图1 幅频特性示意图



## 二、方案选择

### 1. 方案比较与选择

#### (1) 射频电压放大器方案选择

●采用单片集成低噪、电流反馈型运算放大器搭建，如THS3201（带宽高达1.8GHz）、OPA2695等。其优点是能够保证足够的带宽；但是缺点是噪声系数大（11dB），外接元件较多，对电路布线等要求严格，难以做到带内的高平坦度。

●采用固定增益宽带射频放大器，如THS9000（带宽为10MHz-750MHz，带内0.5dB平坦度, 15dB增益）、THS9001、BGA3018（1GHz, 18dB）等<sub>1</sub>



## 二、方案选择

其优点是外接元少，电路简单，对电路布线等设计要求低，采用多片级联很容易做到高增益、高平坦度；缺点是增益固定。

●采用差分方案，如全差分运放LMH6554。使用全差分运放的优点是不仅保证了题目要求的带宽范围，并且有更好的抑制噪声的能力和较强的抗干扰能力，且性能稳定。将全差分低噪声宽带放大器作为前置放大器，能够更有效地保证后级系统性能优异。

### (2) 射频功率放大器方案选择

●采用单片集成射频功率放大器。如AH101中功率



## 二、方案选择

、高线性度射频放大器，其带宽为1.5GHz，400MHz内增益起伏 $\leq 0.5\text{dB}$ ，输出功率高达26.5dBm，电路结构简单，稳定性强，容易搭建。

●输出功率放大级由固定射频增益放大器THS9000构成。

### (3) 增益控制电路选择

●选用宽带、全差分的数控可变增益放大器（DVGA），内部集成了控制单元，其增益由单片机的命令字控制。例如LMH6401，其带宽高达4.5GHz，



## 二、方案选择

增益调节范围为 $-6\text{dB} \sim 26\text{dB}$ ，增益步进为 $1\text{dB}$ 。其优点是增益控制简单灵活，带宽高，并且是全差分型运算放大器，有较强的抗干扰能力。

●选用数控衰减器HMC470，其增益步进 $1\text{dB}$ ，最大衰减 $31\text{dB}$ ，带内平坦度优于 $0.5\text{dB}$ ，带宽宽，电路简单，只需5个IO口管脚控制。

芯片选择举例见表1、表2和表3。



## 二、方案选择

表1 射频增益放大芯片选用举例

型号	带宽 (MHz)	增益 (dB)
THS3201	0-1800	$\leq 20$
THS9000	10-750	15
BGA3018	5-1500	18.5

表2 射频功率放大芯片选用举例

型号	带宽 (MHz)	输出功 (dBm)	电压 (dB)
THS9000	10-750	20.6	15
AH101	20-1500	26.5	13.5



## 二、方案选择

表3 射频电压衰减芯片选用举例

型号	带宽 (MHz)	衰减 (dB)	步进 (dB)
HMC470	0-3000	0-31	1
HMC424	0-13000	0-31.5	0.5
LMH6401	0-45000	6dB~-26dB	1





## 二、方案选择

### 2. 系统总体方案

**【方案一】** 系统主要由五个模块组成：前置低噪声（系统总噪声系数主要取决于第一级噪声系数）固定增益放大电路、宽带可控增益放大可控增益放大电路、LC滤波电路、后级射频功率放大电路、单片机控制电路及显示模块。整个系统由+12V单电源供电。系统总体框图如图2所示。

## 二、方案选择

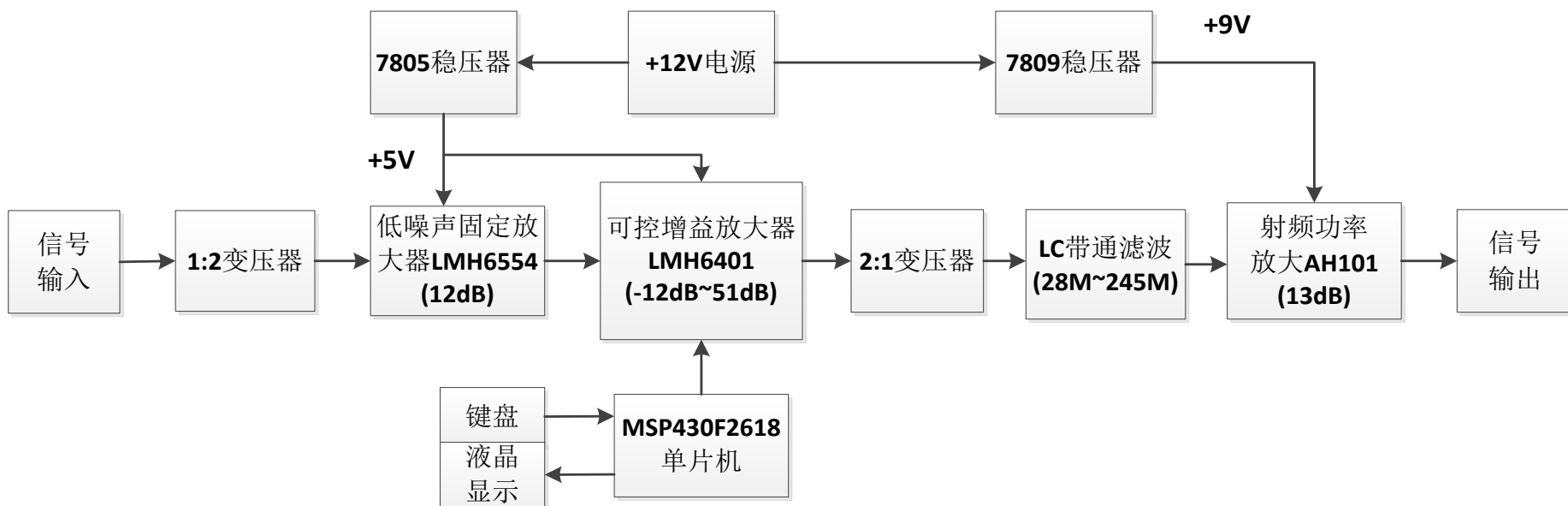


图2 系统总体框图



## 二、方案选择

图中，输入信道的射频变压器不仅将信号源与本放大器系统隔离开，达到了抑制干扰的目的，还完成了1:2的阻抗变换；低噪声固定增益放大器由LMH6554（2.8 GHz 超线性全差动放大器）构成，可控增益放大器由两级LMH6401串联构成；输出射频变压器将差分信号还原为单端信号；LC带通滤波器由高通滤波器和低通滤波器串联构成；射频功率放大器由增益为+13dB的中功率放大器AH101构成；单片机完成了增益设置和增益显示。



## 二、方案选择

**【方案二】**由五个模块组成：增益放大级，带通滤波，程控衰减，输出功率放大级，单片机显示控制。增益放大级采用OPA2695电流负反馈型高速放大器级联实现高增益，输出功率放大级由固定射频增益放大器THS9000构成，带通滤波为多级无源滤波器级联而成，衰减网络由HITTITE公司的HMC470LP3芯片组成，可以对输出按步进1dB衰减，通过2片级联使用，最大可达62dB衰减，该芯片由MSP430F2618的IO口输出高低电平控制，并在LCD液晶上显示系统当前系统增益，如图3所示。

## 二、方案选择

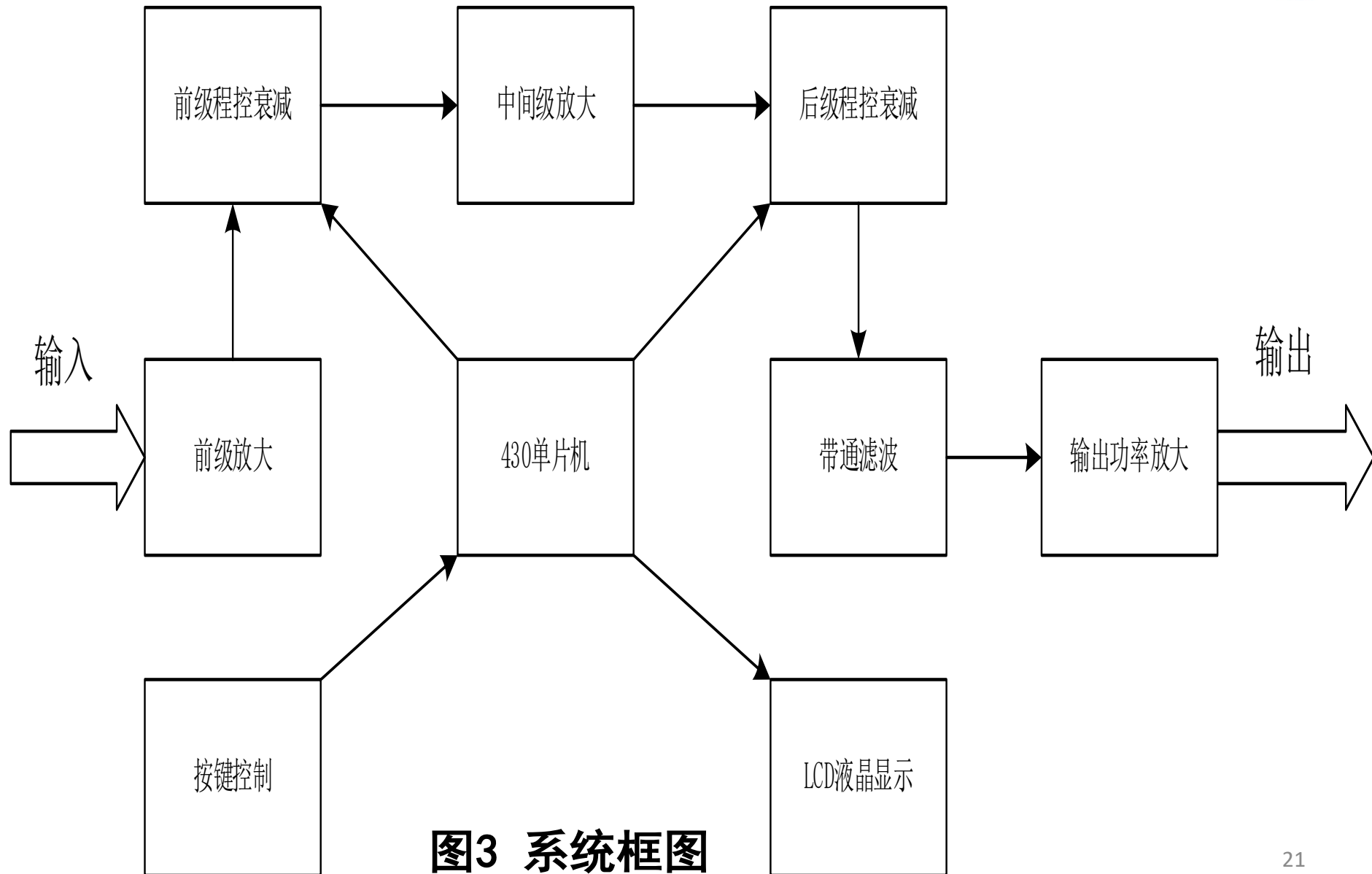


图3 系统框图



# 三、单元电路设计

## 1. 射频电压放大器设计

根据题目要求，要求放大器的最大电压增益

$A_v \geq 52\text{dB}$ ，因此采取多级放大，通过合理的设计各级的放大倍数，就可以实现题目要求。OPA2695作为增益级，具有超高带宽增益，外部电路简单，输出失真小。OPA2695的频率特性如图4所示。

由于OPA2695在放大倍数为2~10倍之间工作稳定，且所选的输出功率放大级为固定的15dB增益，所以电压放大器采用三级电压放大。本设计中均采用同

# 三、单元电路设计

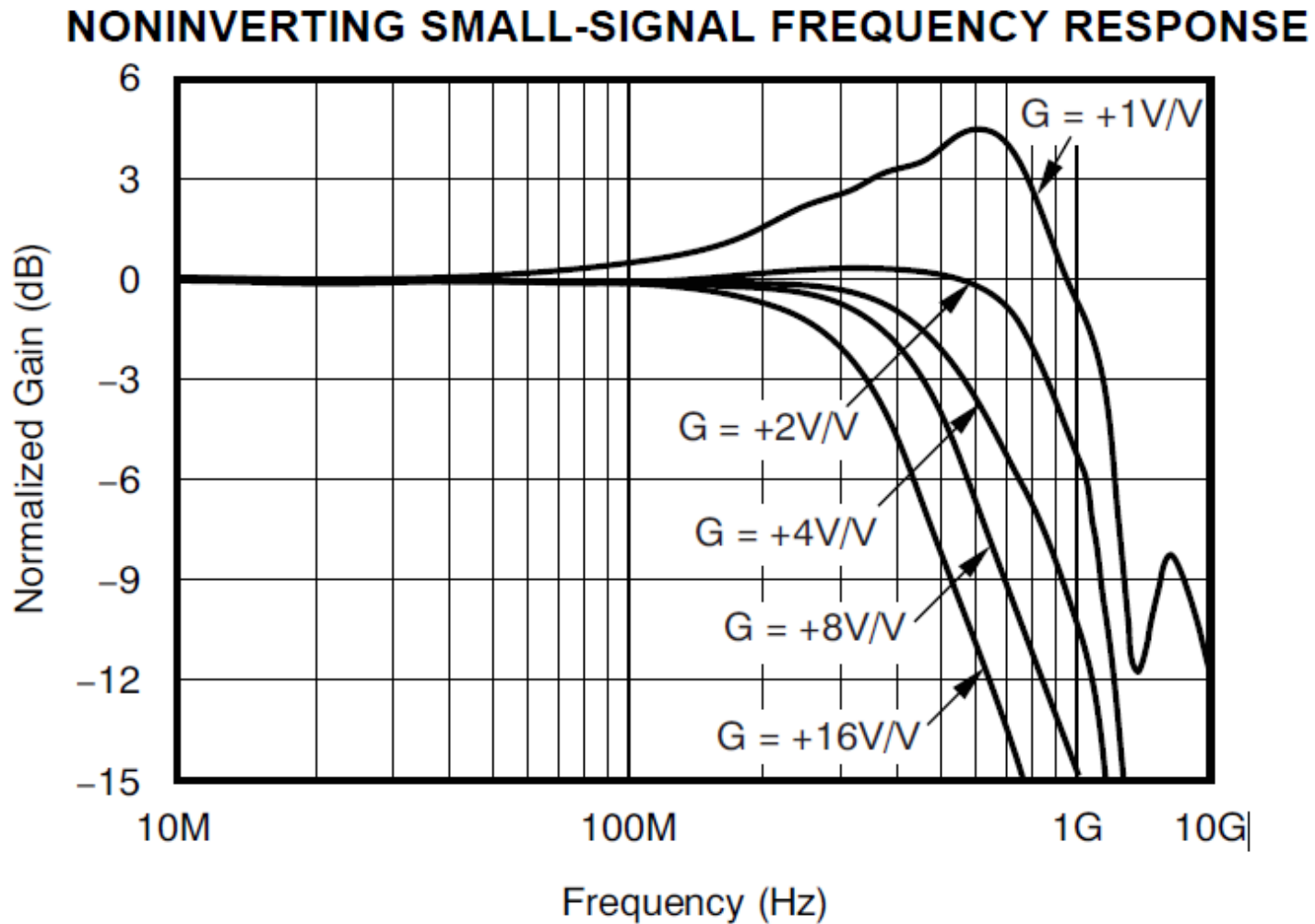


图4 OPA2695的频率特性



## 三、单元电路设计

相输入方式。同相比例运算放大电路的电压放大倍数为

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

设置OPA2695每级增益都为

$$A_{v1} = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{470}{100} = 5.7 \quad A_{v1}(\text{dB}) = 15.1 \text{ dB}$$

三级电压放大总电压增益为

$$A_v(\text{dB}) = 3A_{v1}(\text{dB}) = 45.3 \text{ dB}$$



# 三、单元电路设计

电源采用+12V供电，电路如图5所示。

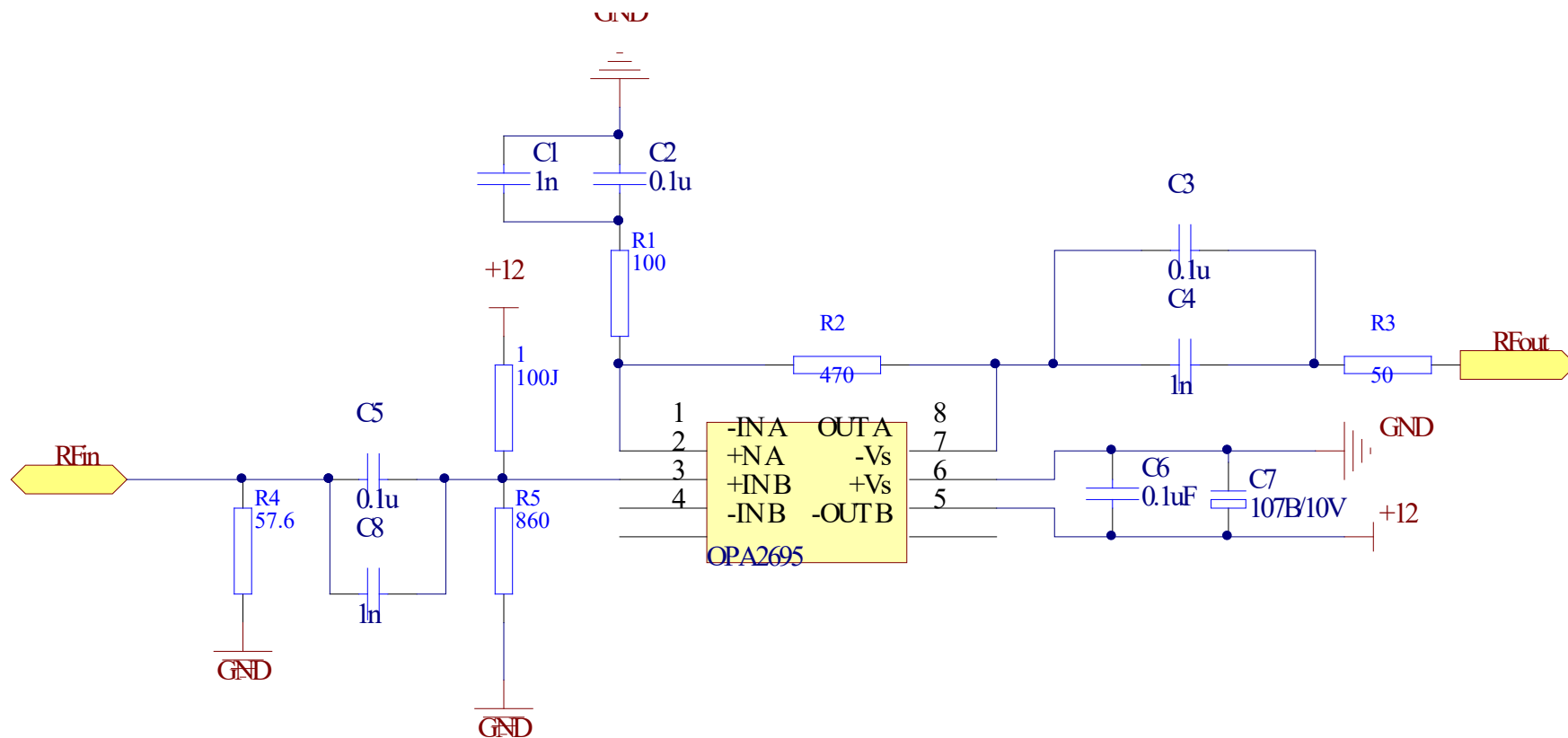


图5 电压放大电路



# 三、单元电路设计

## 2. 功率放大器的设计

OPA2695的输出电流较小，需要后接功率放大器。功放芯片选择THS9000，其内部具有 $50\Omega$ 阻抗匹配，输出功率为可达20dBm，完全满足要求。

THS9000的频率特性如图6所示。

由图6可知，电感的取值是该放大器的带内平坦度的关键参数，所以可以通过改变L的取值，优化放大器的平坦度。该放大器内部具有输入输出阻抗匹配，固定增益15dB，最大不失真输出功率20dBm，满足要求。

# 三、单元电路设计

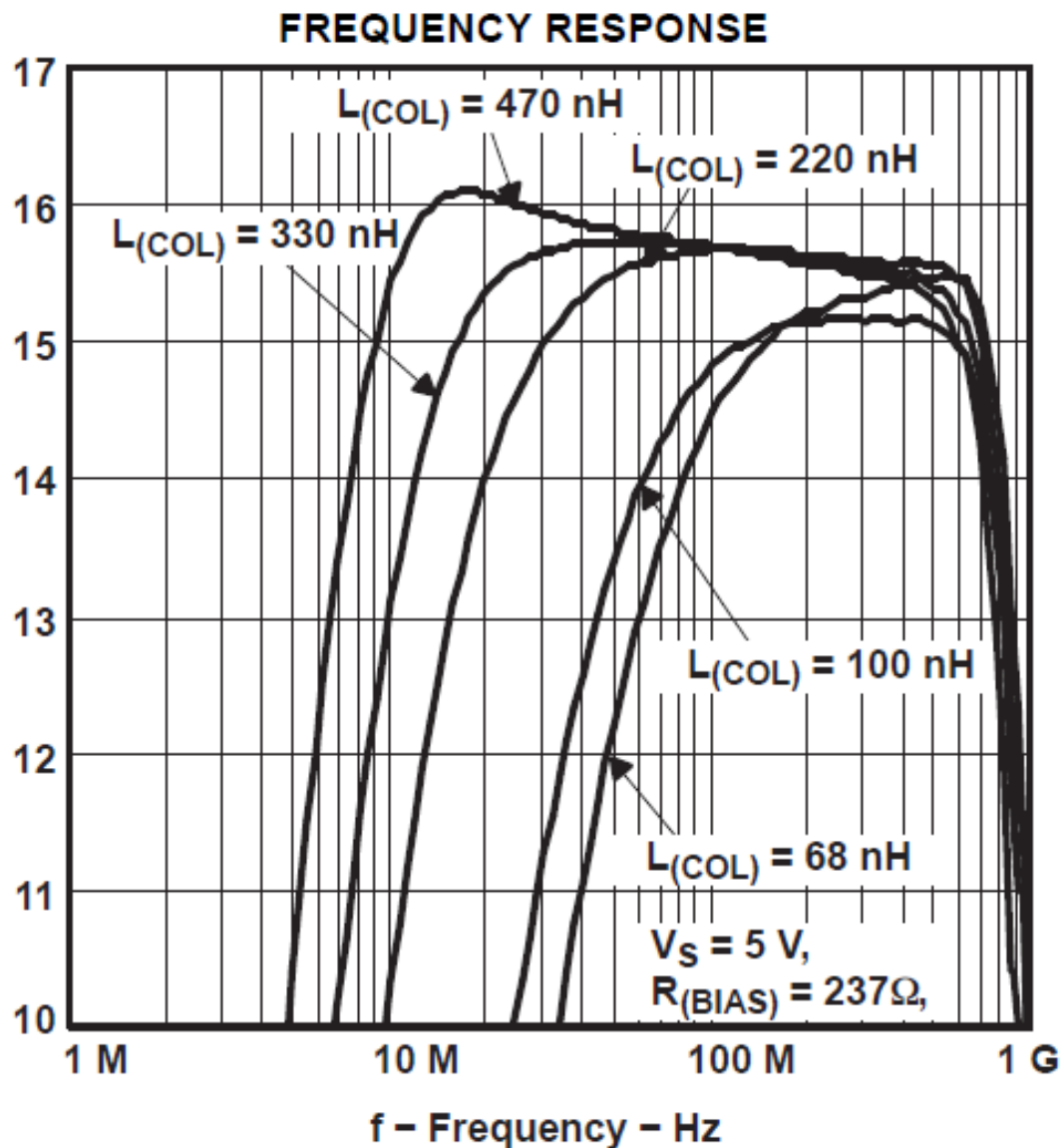


图6 THS9000的频率特性

如图7所示。 **L2选为470nH**

### 图7 THS9000功率放大器



### 三、单元电路设计

综上所述，加上最后一级固定增益，射频放大器的总电压增益为

$$A_{v\Sigma}(\text{dB}) = 3A_{v1}(\text{dB}) + 15 = 60.3 \text{ dB}$$

**需要注意的是，放大器级数越多，通频带越窄。对于每级相同的多级放大器不难得到如下公式：**

$$\left| \frac{\dot{A}_{vh1}(jf)}{\dot{A}_{vm1}} \right|^n = \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_H}{f_{H1}} \right)^2}} \right)^n = \frac{1}{\sqrt{2}}$$



# 三、单元电路设计

$$f_H = \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1} f_{H1}$$

$$f_L = \frac{f_{L1}}{\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}}$$

表  $f_H / f_{H1}$  和  $f_L / f_{L1}$  与级数n的关系

n	1	2	3	4	5
$\frac{f_H}{f_{H1}} = \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}$	1	0.644	0.509	0.435	0.385
$\frac{f_L}{f_{L1}} = \frac{1}{\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}}$	1	1.55	1.96	2.30	2.60



### 三、单元电路设计

对于**每级不相同**的多级放大器可从参考书上得到不同的近似结果。如：

$$f_L \approx 1.1 \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + f_{L3}^2 + \dots}$$

$$f_H \approx \frac{1}{1.1 \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \frac{1}{f_{H3}^2} + \dots}}$$



# 三、单元电路设计

## 3. 无源滤波器的设计

常用三种滤波器性能比较：

(1) 巴特沃斯滤波器：是个单调上升函数，通带、阻带均无波动，结构简单；缺点：带外衰减速率较慢。用于要求不高的场所。

(2) 椭圆滤波器：通带和阻带都有波动起伏，其特征可用椭圆函数表示，结构复杂；优点：边带截止率可以做的很陡峭。

(3) 切比雪夫滤波器：通带有波动，边带仍为单调上升函数，介于前两者之间。



# 三、单元电路设计

巴特沃斯滤波器——通带内响应最为平坦。  
其幅频特性如图8所示。

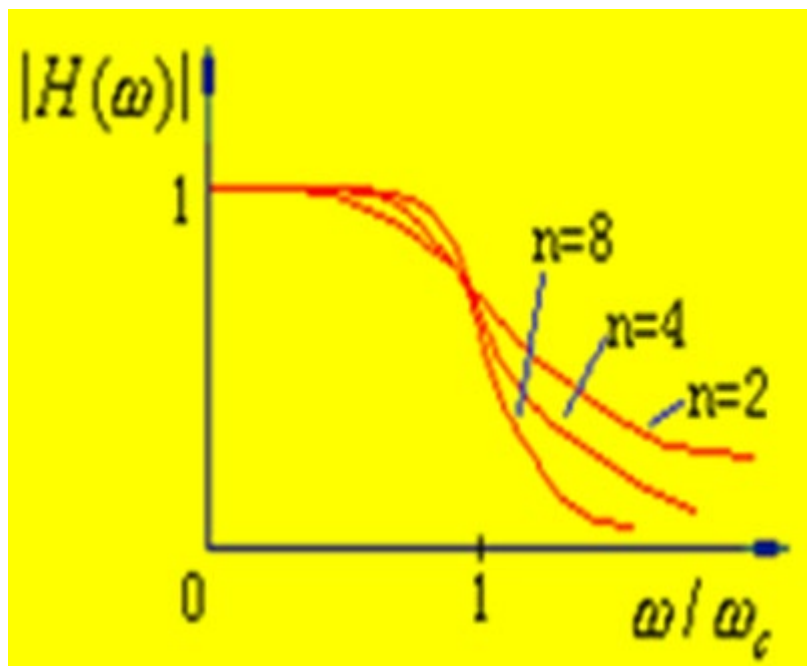


图8 巴特沃斯滤波器幅频特性

# 三、单元电路设计

切比雪夫滤波器——截止特性特别好；群延时特性不太好；通带内有等波纹起伏。其幅频特性如图9所示。

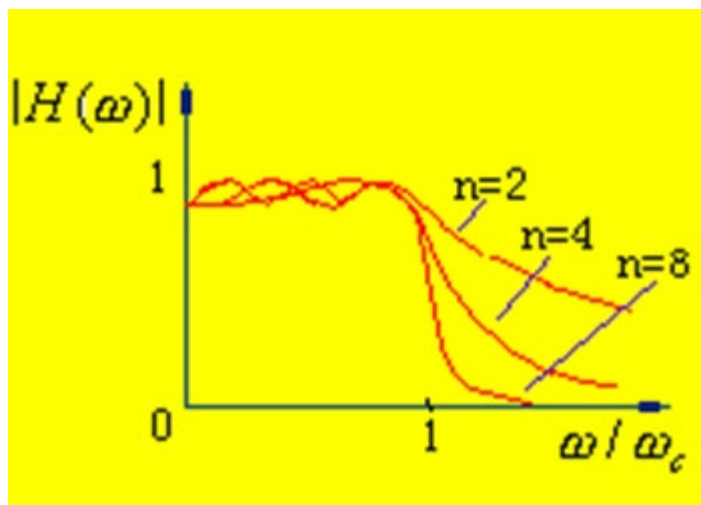


图9 切比雪夫滤波器幅频特性



### 三、单元电路设计

同阶数切比雪夫与巴特沃斯的两者比较，切比雪夫比巴特沃斯的**优势就是它的滚降更加陡峭，在截止频率处更接近于理想的，但是在通带（阻带）内频率响应有等幅波动；巴特沃斯恰恰相反，滚降不够陡峭，但是在通带内是最平坦的，所以被誉为“通带最平坦滤波器”**。两者不能比谁好谁坏，只能说各有千秋，具体选择那一种只能根据要求来，如果要求阶数低而陡降，且对于通带（阻带）频响要求不高，允许有波动，就选切比雪夫，这是一种低成本截止特性好的选择。结合本题分析如下：



### 三、单元电路设计

**方案一：采用切比雪夫滤波器，可以使阻带内下降最快，容易满足270MHz时， $A_v \leq 20\text{dB}$ ，但是切比雪夫滤波器带内平坦度差且不易调试。**

**方案二：采用巴特沃斯滤波器，通带内和阻带内最平坦且易调试，但是，下降较慢，可以提高阶数或在滤波器的基础上加上谐振点，从而使带外增益满足题目要求的 $A_v \leq 20\text{dB}$ ，同时满足在50MHz-160MHz频率范围内增益波动不大于2dB。**



### 三、单元电路设计

**方案三：采用椭圆滤波器，椭圆滤波器的通带和阻带都具有等波纹特性，因此通带、阻带逼近特性良好，而且它的过渡带比较窄，但是，通带内纹波较大。**

**综上所述，本题选用方案二巴特沃斯滤波器。**

**利用专业的滤波器设计软件Filter Solution进行多阶无源滤波器软件设计与仿真，如图9所示。并通过电容电感的选择优化滤波器的性能。**

**采用12阶高通与12阶低通无源滤波器级联而成的无源带通巴特沃兹滤波器，其具有带内平坦度优良，**

# 三、单元电路设计

带外衰减程度大的特点。

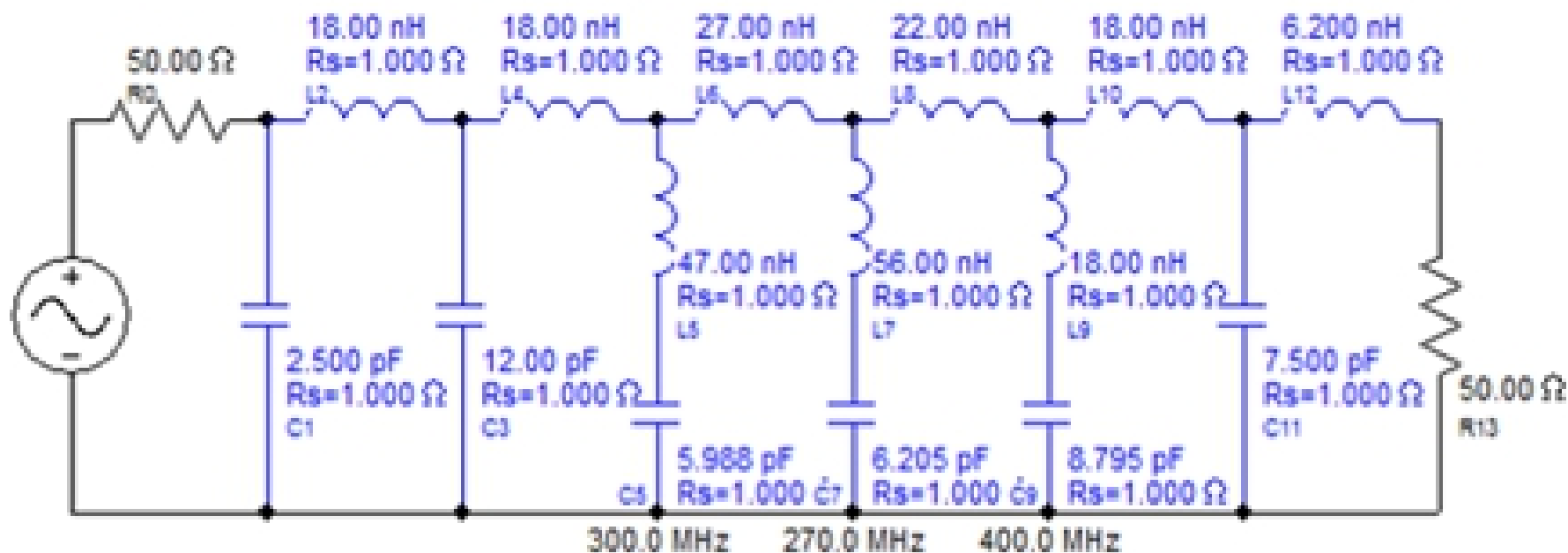


图9 (a) 无源低通滤波器电路

# 三、单元电路设计

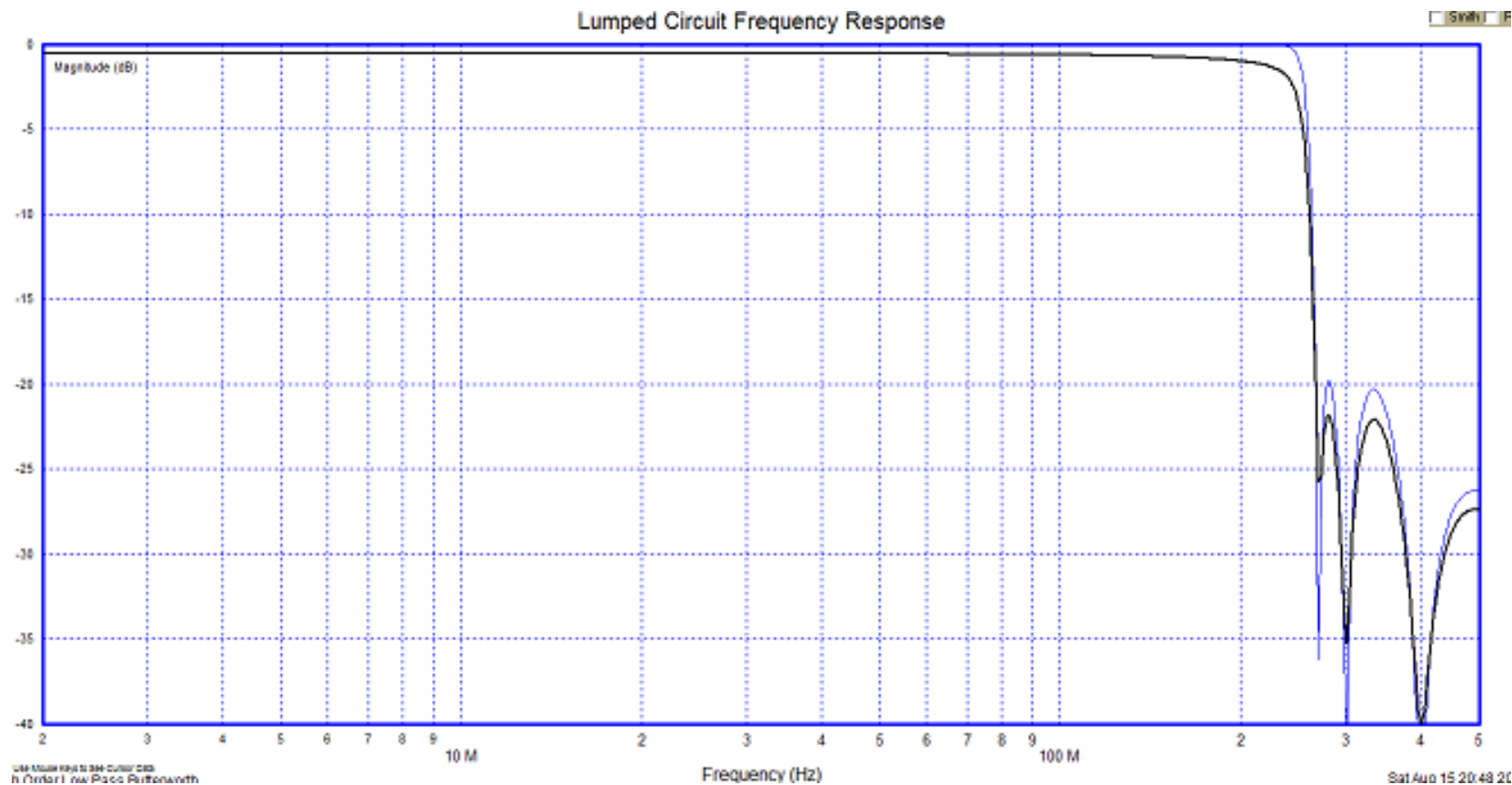


图9（b）无源低通滤波器仿真结果

# 三、单元电路设计

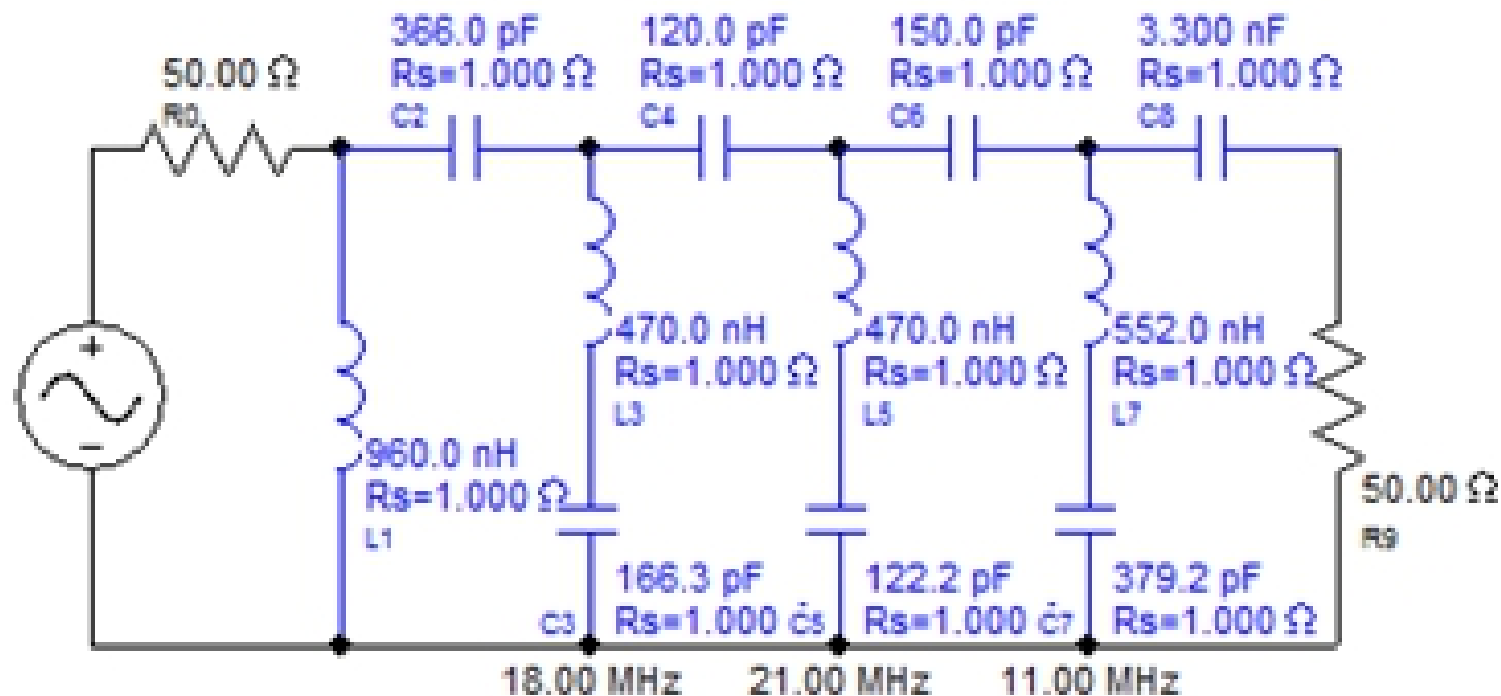


图9 (c) 无源高通滤波器电路



# 三、单元电路设计

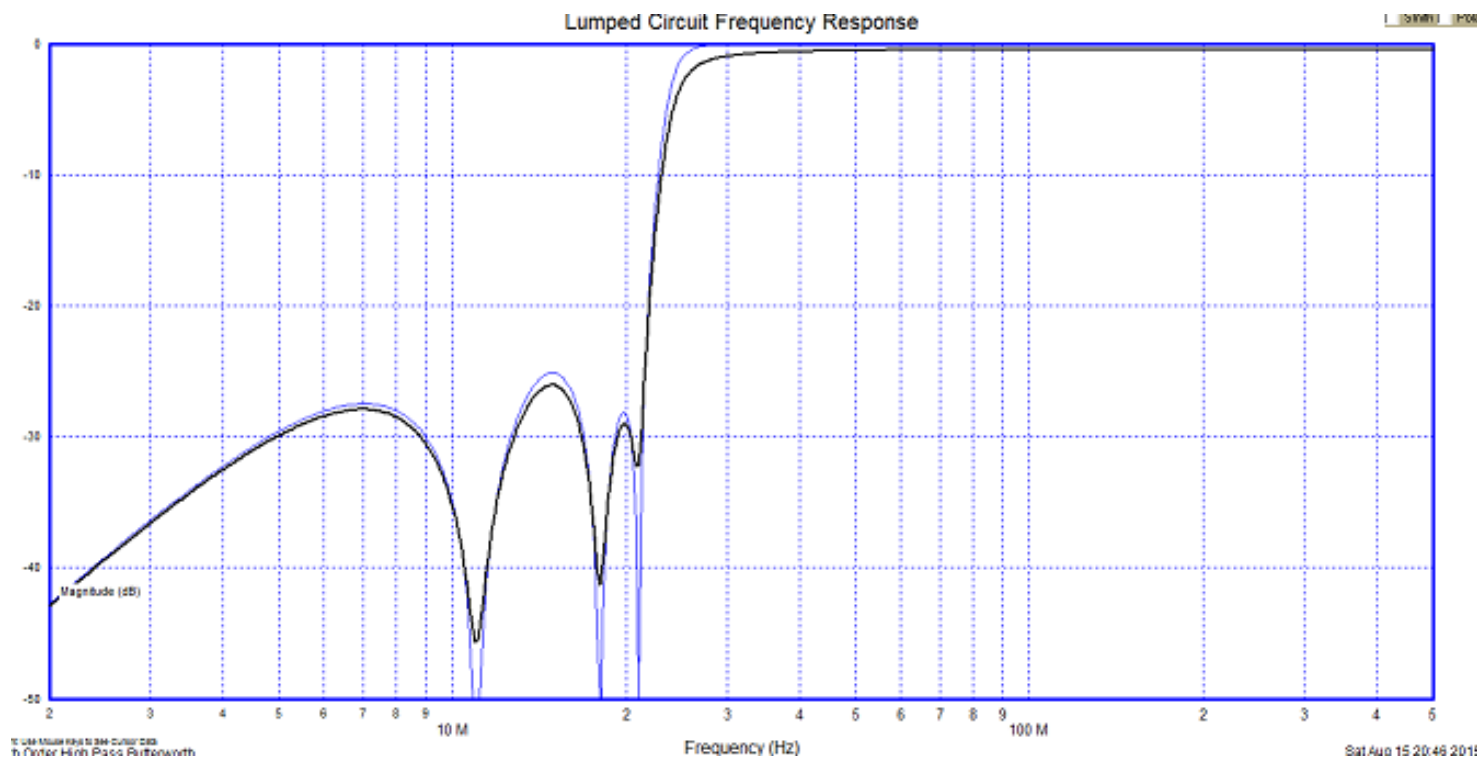


图9（d）无源高通滤波器仿真结果



# 三、单元电路设计

## 4. 增益程控设计

采用数字衰减器，外围电路简单，性能可靠。

HITTITE公司的HMC470LP3 是一个宽带5位GaAs IC 数字衰减器，工作可接近直流。使其可以广泛用于各种RF和IF 应用中。HMC470LP的控制位分别对应1dB、2dB、4dB、8dB、16dB 衰减值，最多可衰减31dB。只需5个IO口管脚控制。本题要求步进满足小于4dB，误差小于2dB，且输出增益控制范围为12dB~52dB，这要求输出衰减至少40dB，可采用**两级**程控衰减。程控衰减电路如图10所示。

# 三、单元电路设计

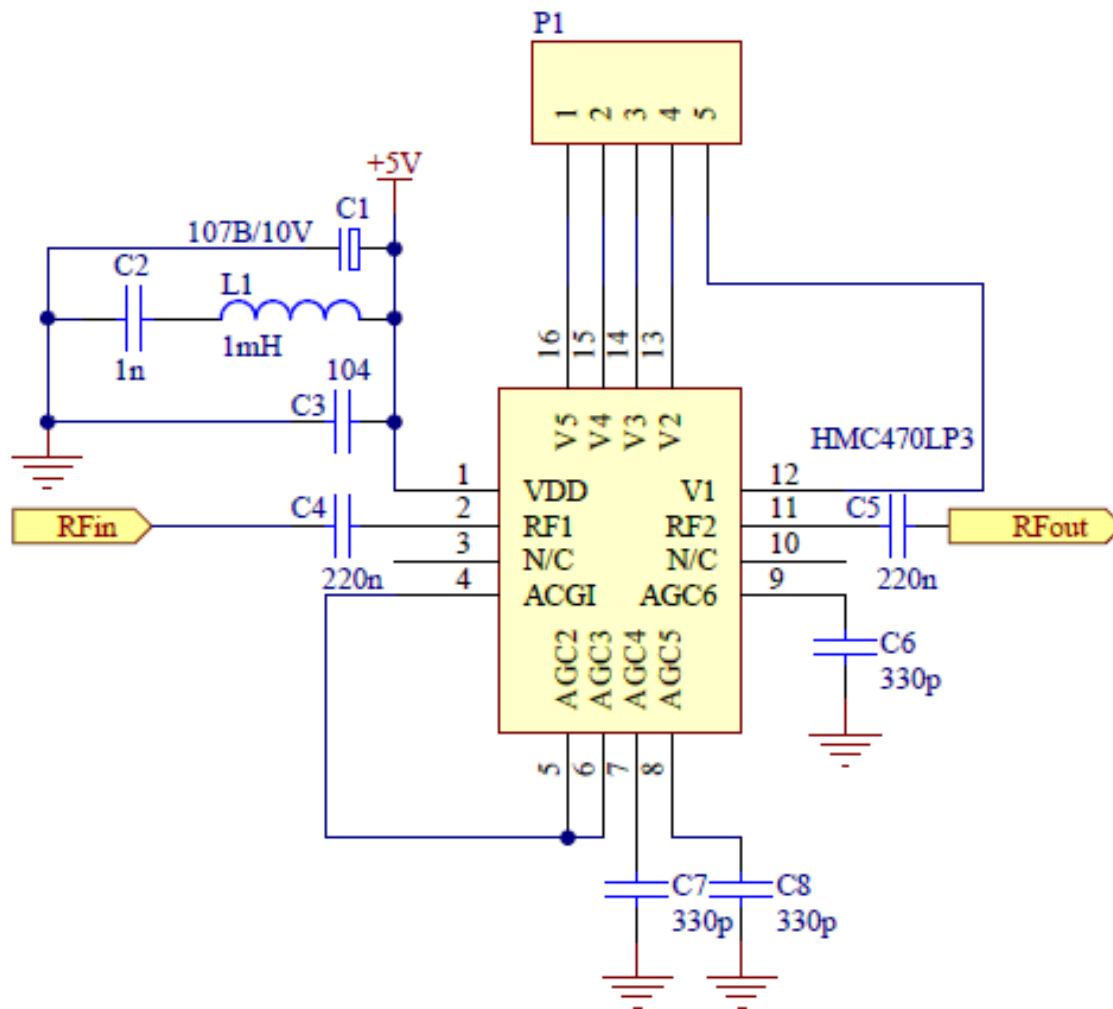


图10 程控衰减电路



# 三、单元电路设计

## 5. 电源

系统外接电源为+12V，电压放大级都为+12V供电，功率输出级，用LM7805电源稳压芯片将+12V降压为5V给THS9000供电，MSP430F2618单片机及LCD液晶屏可由+12V通过LM317电源稳压芯片转为3.3V供电。

给射频电路供电的DC电源，应该注意两点：

- (1) 供电电压应该稳定；
- (2) DC电源的高频内阻要小。

实际应用中，首先要采用稳压电源，特别是前级



## 三、单元电路设计

电路。而降低DC电源高频内阻的办法是在电源电路增设小容量高频滤波电容，如100pF。

### 6. 程序的设计

#### (1) 程序功能描述与设计思路

##### ①程序功能描述

根据题目要求，软件部分主要实现键盘的设置和显示。

(a) 键盘实现功能：设置增益、步进设置。

(b) 显示部分：显示当前增益、步进值、错误增益设置提示。

#### (2) 程序设计思路



### 三、单元电路设计

通过MSP430F2618的Timer\_A定时器，定时扫描键盘，在按下键盘后在主程序中获取在所按下的按键值后，根据当前状态执行相应的功能，如显示，增益控制，错误提示等。整体单片机处于非阻塞状态，使得各项功能很好的实现。

# 三、单元电路设计

程序流程框图如图11所示。

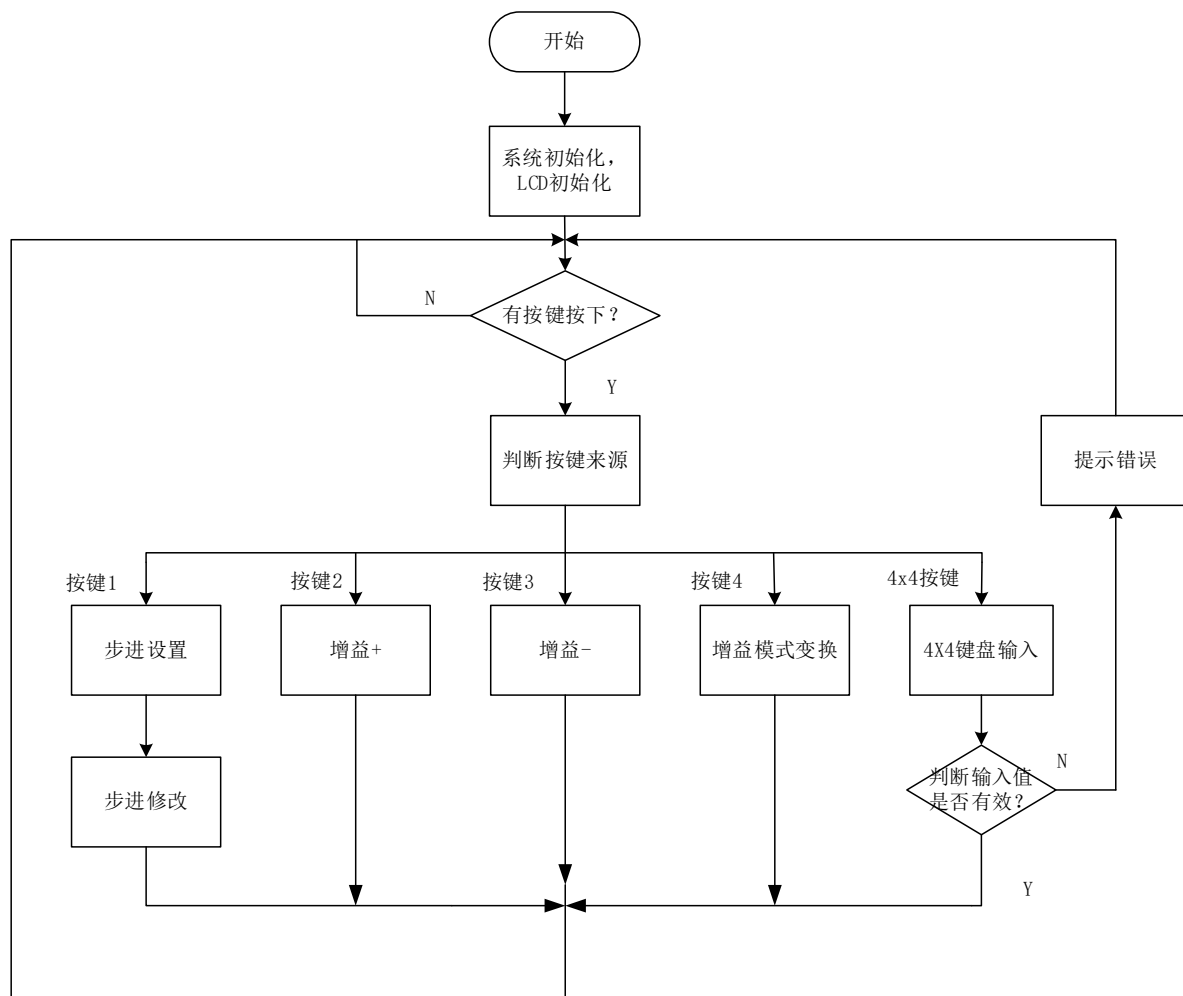


图11 程序流程框图



## 四、射频放大器稳定性

由于采用集成芯片，相比分立元件具有更优异的温度系数，部件具有更高的稳定性。

但放大器的稳定性与系统的相位裕度密切相关。自激振荡是由于在通过运放及反馈回路的过程中有附加相移，假如附加相移接近 $180^\circ$ ，则电路产生正反馈。由于电路工作频率高，运放级数多，且噪声频谱噪声很宽，所以稳定性易受影响，制作过程中极易出现自激现象。采取以下措施提高稳定性：





## 四、射频放大器稳定性

- (1) 使用芯片手册推荐的电路，以保证运放工作在最佳稳定状态。
- (2) 在总体设计上，每级放大器单独模块，并安装屏蔽装置，减小级间干扰，以消除放大器间的相互影响。
- (3) 采用同轴线缆连接，每级运放的输入输出级使用SMA接头。



## 五、结构工艺

在PCB设计中，布线的基本原则为：在组装密度许可情况下后，尽量选用低密度布线设计，并且信号走线尽量粗细一致，有利于阻抗匹配。

对于射频电路，信号线的走向、宽度、线间距的不合理设计，可能造成信号信号传输线之间的交叉干扰；另外，系统电源自身还存在噪声干扰，所以在设计射频电路PCB时一定要综合考虑，合理布线。

布线时，所有走线应远离PCB板的边框（2mm左右），以免PCB板制作时造成断线或有断线的隐



## 五、结构工艺

患。电源线要尽可能宽，以减少环路电阻，同时，使电源线、地线的走向和数据传递的方向一致，以提高抗干扰能力；所布信号线应尽可能短，并尽量减少过孔数目；各元器件间的连线越短越好，以减少分布参数和相互间的电磁干扰；对于不相容的信号线应尽量避免相互远离，而且尽量避免平行走线，而在正向两面的信号线应相互垂直；布线时是需要拐角的地方应以 $135^\circ$ 角为宜，避免拐直角。

布线时与焊盘直接相连的线条不宜太宽，走线应尽量离开不相连的元器件，以免短路；过孔不宜画在



## 五、结构工艺

元器件上，且应尽量远离不相连的元器件，以免在生产中出现虚焊、连焊、短路等现象。

在射频电路PCB设计中，电源线和地线的正确布线显得尤其重要，合理的设计是克服电磁干扰的最重要的手段。PCB上相当多的干扰源是通过电源和地线产生的，其中地线引起的噪声干扰最大。

地线容易形成电磁干扰的主要原因于地线存在阻抗。当有电流流过地线时，就会在地线上产生电压，从而产生地线环路电流，形成地线的环路干扰。当多个电路共用一段地线时，就会形成公共阻抗耦合，从



## 五、结构工艺

而产生所谓的地线噪声。因此，在对射频电路PCB的地线进行布线时应该做到：

首先，对电路进行分块处理，射频电路基本上可分成高频放大、混频、解调、本振等部分，要为各个电路模块提供一个公共电位参考点即各模块电路各自的地线，这样信号就可以在不同的电路模块之间传输。然后，汇总于射频电路PCB接入地线的地方，即汇总于总地线。由于只存在一个参考点，因此没有公共阻抗耦合存在，从而也就没有相互干扰问题。



## 五、结构工艺

数字区与模拟区尽可能地线进行隔离，并且数字地与模拟地要分离，最后接于电源地。这是因为模拟信号和数字信号都要回流到地，数字信号变化速度快，从而在数字地上引起的噪声就会很大，而模拟信号需要一个干净的地。如果模拟地和数字地混在一起，噪声就会影响到模拟信号。所以，通常模拟地和数字地要分开处理，然后通过细的走线连在一起，或者单点接在一起。总的思想是尽量阻隔数字地上的噪声窜到模拟地上。



## 五、结构工艺

在各部分电路内部的地线也要注意单点接地原则，尽量减小信号环路面积，并与相应的滤波电路的地方就近相接。

在空间允许的情况下，各模块之间最好能以地线进行隔离，防止相互之间的信号耦合效应。

热稳定性——散热。

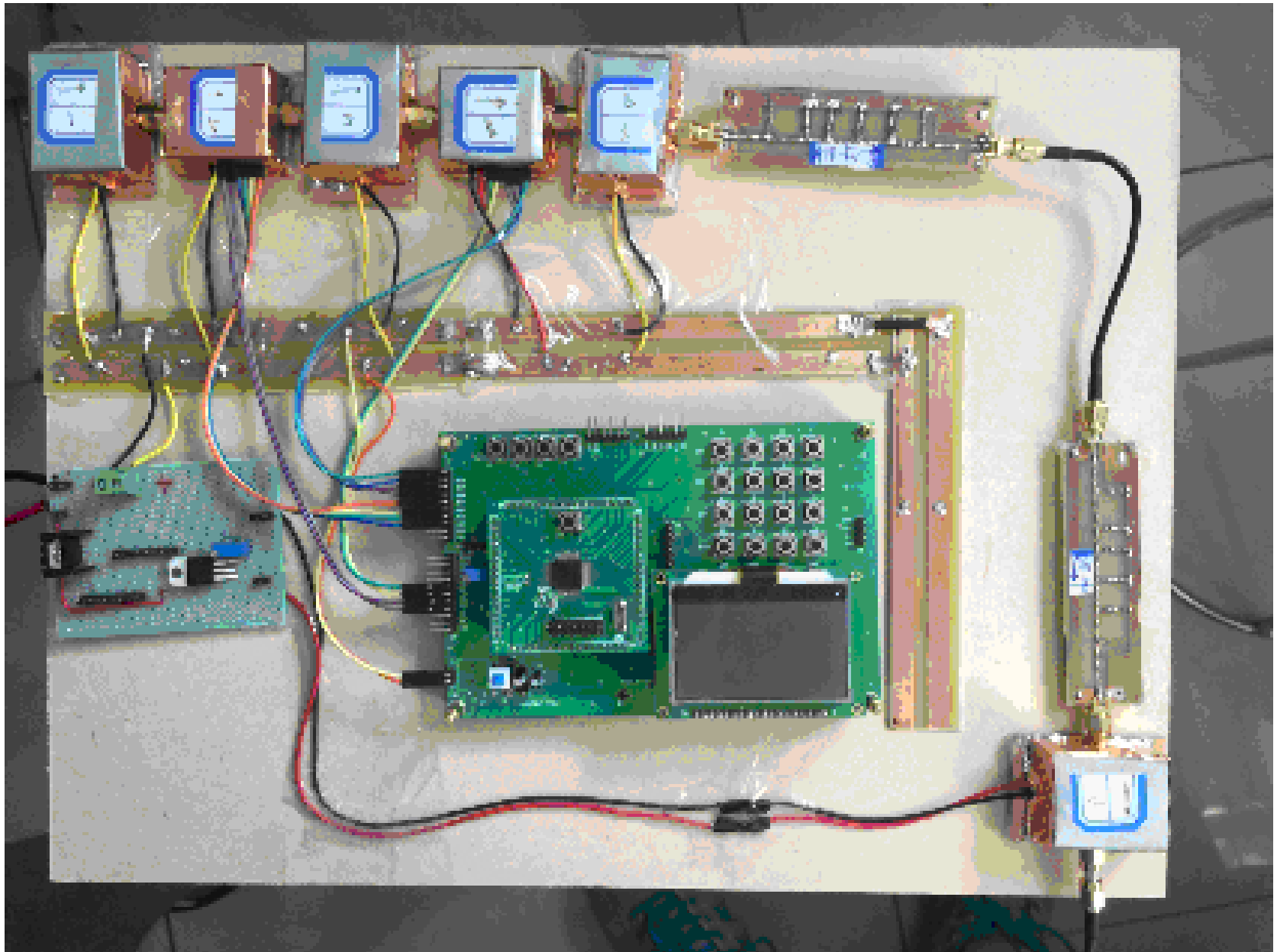


# 五、结构工艺





## 五、结构工艺





## 六、问题与收获

### ●问题：

1. 不是单电源供电；
2. 输入信号动态范围不够，输出信号失真；
3. 电压增益不满足；
4. 滤波器做得不好，带外衰减不满足要求；
5. 放大器有自激，性能不稳。

### ●收获：

1. 一部分同学接触到了射频电路，学会设计与调试；
2. 促进了实验室的建设。