

# 射频特训班



凡亿教育®  
WWW.FANYEDU.COM

WWW.FANYEDU.COM



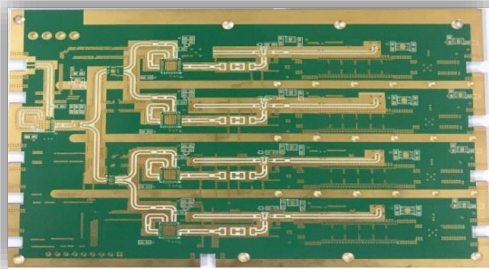
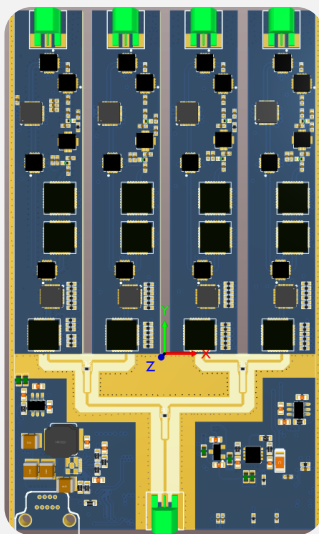
## 第四讲 GNSS零中频接收机设计实践

主讲：汪 朋

QQ: 3180564167

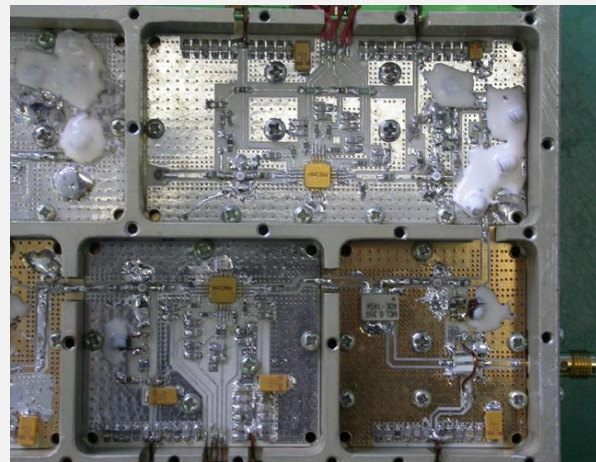
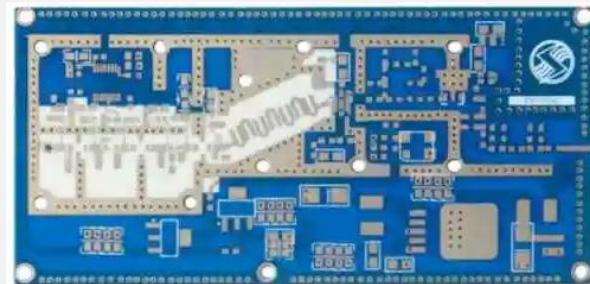
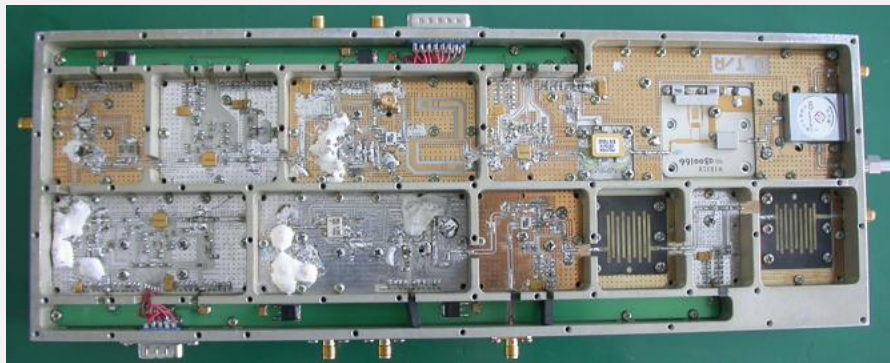
# 零中频接收机系统设计技术

## 板级微波系统



# 零中频接收机系统设计技术

板级微波  
系统



# 零中频接收机系统设计技术

学会什么？

## 设计板级GPS L1频段的近零中频接收机系统

### 要求：

接收机输入频率为1575MHz，输出IQ基带信号，详细指标要求如下：

输入频率	GPS L1 1575.42MHz
输入功率范围	-85dBm-60dBm
系统增益	>60dB
噪声系数	<3.5dB
中频频率	512KHz
带宽	3MHz
增益动态范围	0-30dB
镜像抑制	>45dB



01

收发机架构

02

频率合成器原理

03

核心器件

03

接收机链路设计演示

Part

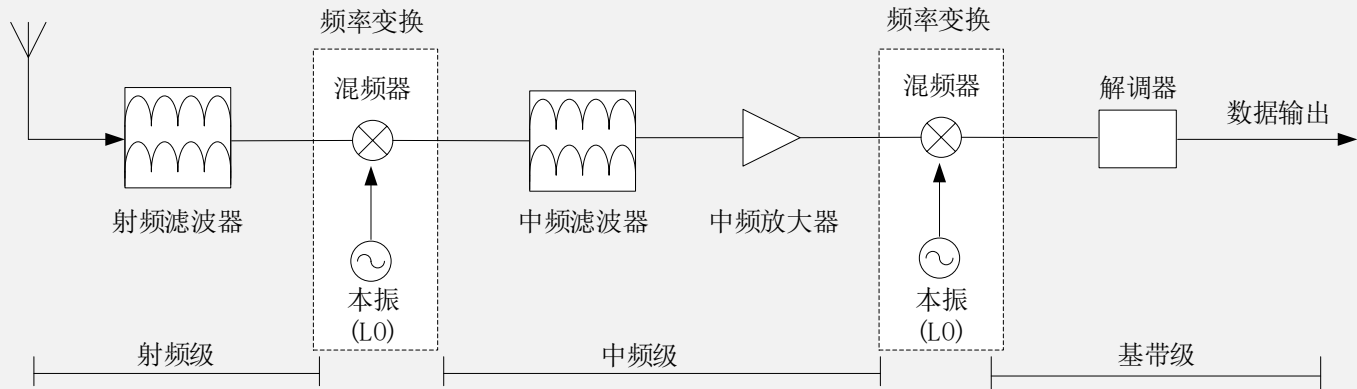
1

# 二次变频发射机与接收机

# 零中频接收机系统设计技术

## 超外差接收机

天线接收到的射频信号经过射频滤波器滤出带外干扰信号，滤波处理后的射频信号通过低噪声放大器放大后，再经镜像滤波器滤波后与本振信号混频，混频得到的一中频信号滤波放大后与第二本振混频得到最终所需的中频信号。二次变频接收机经两次混频得到的中频频率一般比较低，最后经解调处理得到所需要的有用信号。



板级设计难点:

- [1] 混频器与时钟系统;
- [2] 中频的自动增益控制。

# 零中频接收机系统设计技术

## 零中频接收机

优点:

结构简单, 容易集成, 成本较低;

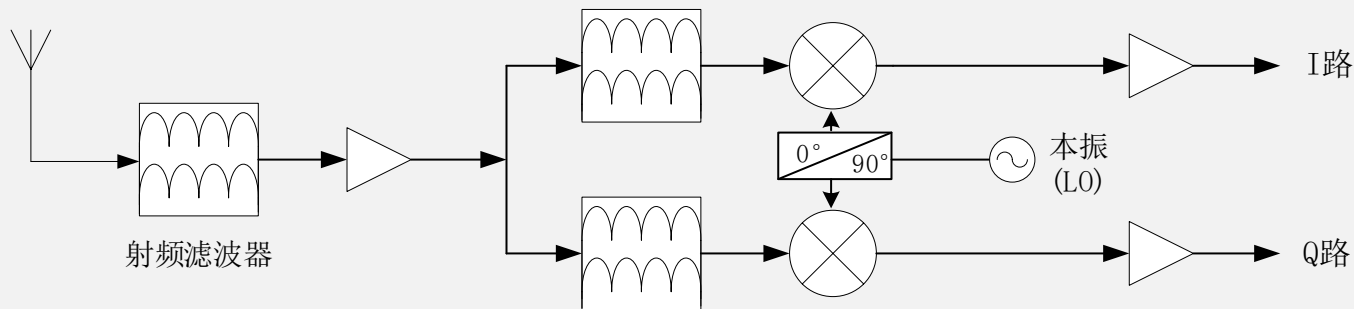
缺点:

[1] 本振泄露风险;

[2] 直流偏差: 主要由信号的自混频引起, 本振信号泄漏到射频端经LNA、射频滤波器、天线、天线近端的反射面反射回来之后与本振信号自混频;

[3] 偶次失真干扰: 射频信号的二次谐波与本振信号的二次谐波混频后, 产生的信号混入基带信号中, 产生干扰;

[4] 低频噪声干扰 ( $1/f$ ): 低频闪烁噪声主要集中在较低频段, 因此  $1/f$  噪声, 容易搬移到基带信号中, 影响基带信号质量。





# 零中频接收机系统设计技术

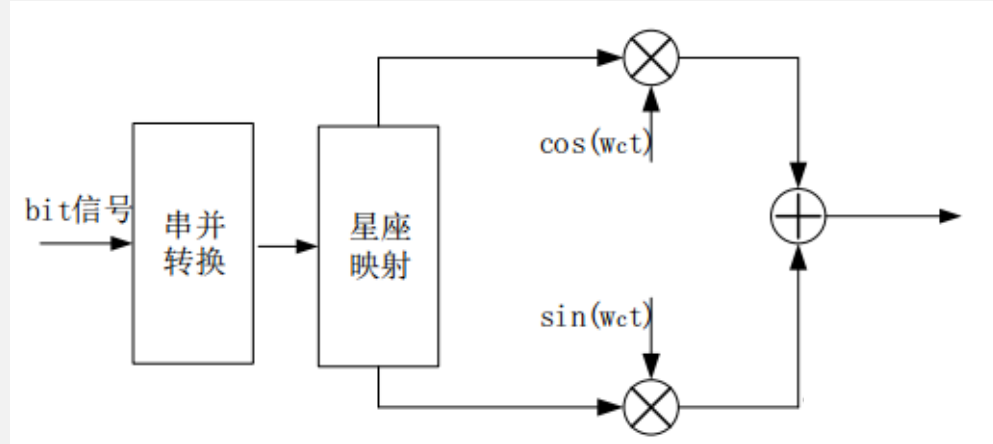
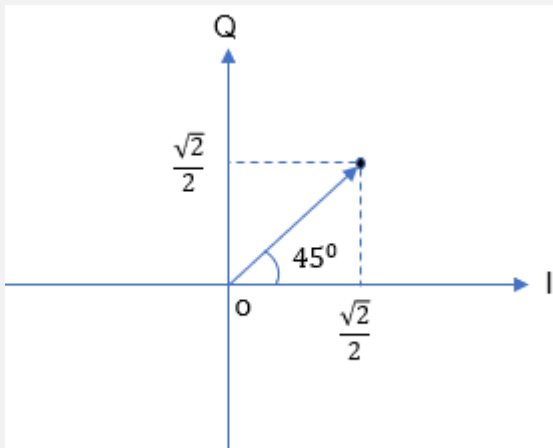
## 零中频接收机

### IQ调制

数字IQ调制的过程就是将原始比特流数据按照一定的规则映射到IQ坐标系的过程，IQ坐标系本质上就是复数坐标系，映射完成后将得到I和Q两路信号，然后相加得到要发射的射频信号

### IQ调制的优势

- [1] IQ调制可以通过提高符号速率或者采用高阶调制实现更高的数据速率;
- [2] IQ调制可以非常方便地将符号映射至矢量坐标系中，从而完成数字调制;
- [3] IQ调制具有更高地频谱利用率

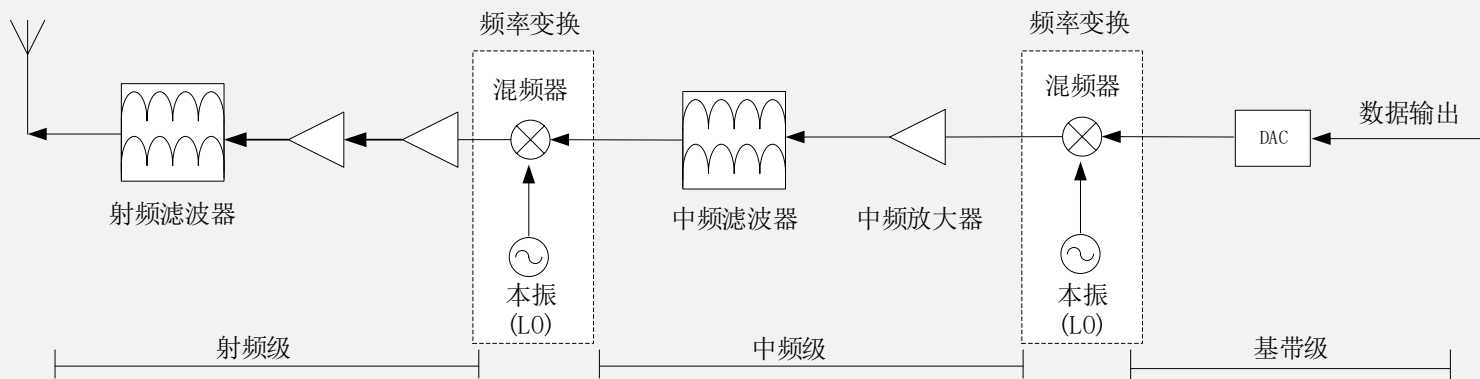


# 零中频接收机系统设计技术

## 二次变频发射机

二次变频发射机将数字信号通过数字上变频的方式经DAC转换为中频模拟信号，通过多次变频滤波放大后经天线辐射输出。

二次变频发射机结构相对复杂，多次变频产生的组合杂散比较多，滤波器设计成本比较高，但相对于零中频发射机来说，幅度一致性和相位一致性比较好。



[1] 混频器和时钟系统;

[2] 大功率放大器。

# Part 2 频率合成器

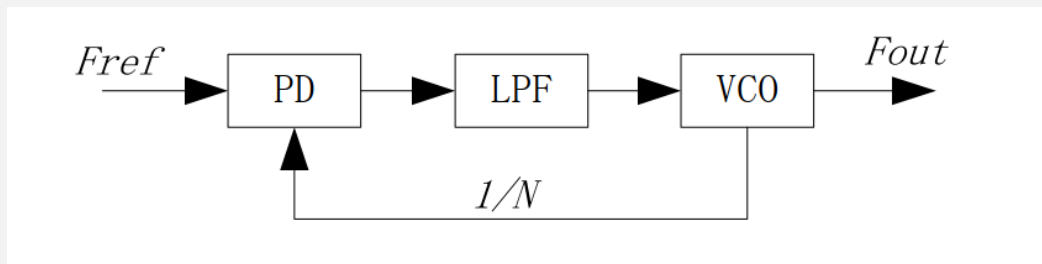
# 零中频接收机系统设计技术

## 锁相环

锁相环的本质：

通过外部晶体或者晶振的输入频率信号，来稳定内部的高频VCO输出信号。

带反馈功能和输出频率稳定作用的压控振荡器



# 零中频接收机系统设计技术

## 频率合成系统

### 频率合成器主要类型包括

#### [1]直接频率合成器

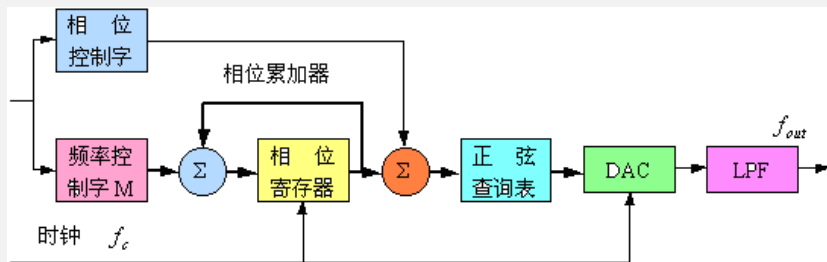
直接频率合成器是最早的频率合成器，它主要通过基准参考频率信号的倍频、分频以及混频等数学运算产生所需要的频率信号，再通过开关滤波器组，滤除不需要的信号；

#### [2]锁相环间接频率合成器(PLL)；

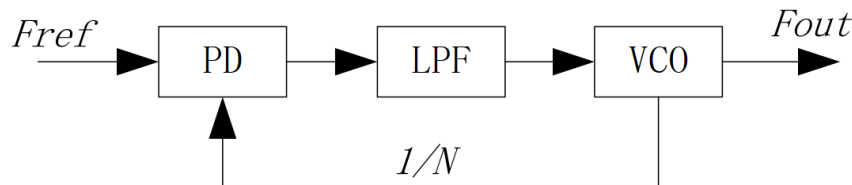
锁相环频率合成器是输出信号与输入基准信号相位同步的电路，通过误差控制电压来调整压控振荡器的输出频率，优点是具有很宽的频率范围，良好的杂散抑制性能，频谱比较干净；

#### [3]直接数字频率合成器(DDS)

直接数字频率合成器是把正弦波的幅度参数和相位参数按规律存储在寄存器中，从而得到离散的正弦波数字信号，再通过DA变换之后形成射频信号



DDS基本结构框图



# 零中频接收机系统设计技术

## 锁相环

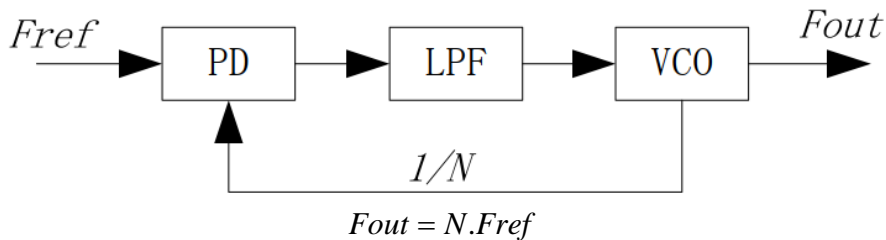
锁相环(PLL: Phase-locked loops)是一种利用反馈控制原理实现的频率及相位的同步技术,其作用是将电路输出的时钟与其外部的参考时钟保持同步。当参考时钟的频率或相位发生改变时,锁相环会检测到这种变化,并且通过其内部的反馈系统来调节输出频率,直到两者重新同步,这种同步又称为“锁相”。锁相环由鉴相器(PD)、环路滤波器(LPF)和压控振荡器(VCO)三个基本部件组成。

鉴频鉴相器: 对输入的参考信号和反馈回路的信号进行频率和相位的比较,输出一个代表两者差异的信号至低通滤波器。

低通滤波器: 将输入信号中的高频成分滤除,保留直流部分送至压控振荡器。

压控振荡器: 输出一个周期信号,其频率由输入电压所控制。

反馈回路: 将压控振荡器输出的信号送回至鉴频鉴相器。通常压控振荡器的输出信号的频率大于参考信号的频率,因此需在此加入分频器以降低频率。



# 零中频接收机系统设计技术

## 鉴相器

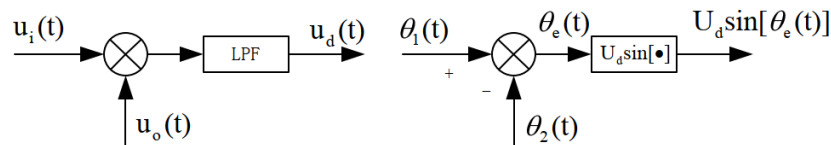
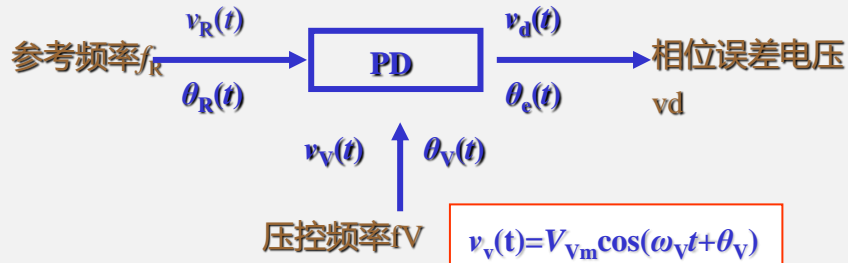
### 鉴相器

鉴相器是一个相位比较装置，用来检测输入信号的相位 $\theta_i(t)$ 与反馈信号的相位差 $\theta_e(t)$ 。使输出电压与两个输入信号之间的相位差有确定关系的电路，通常是一个混频器或者是模拟乘法器。也就是能够鉴别出输入信号的相差的器件。

鉴相器分为模拟鉴相器和数字鉴相器。

鉴相器的输出电压是控制VCO输出频率的唯一因素，而鉴相器的输出电压和VCO的输出频率有固定数学关系，以此形成对VCO的输出频率的约束和控制。

$$v_R(t) = V_{Rm} \sin(\omega_R t + \theta_R)$$



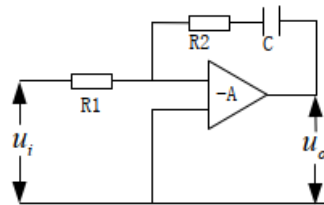
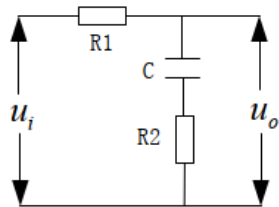
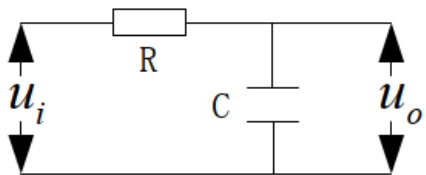
# 零中频接收机系统设计技术

## 环路滤波器

环路滤波器可以理解为一个低通滤波器，它对锁相环锁定时间和相位噪声等各项参数有重要影响。常用的环路滤波器有 RC 积分滤波器，无源比例积分滤波器和有源比例积分滤波器三种。

主要作用：

滤除纹波，为VCO提供直流电压。





# 零中频接收机系统设计技术

## 锁相环设计指标

### [1] 相位噪声

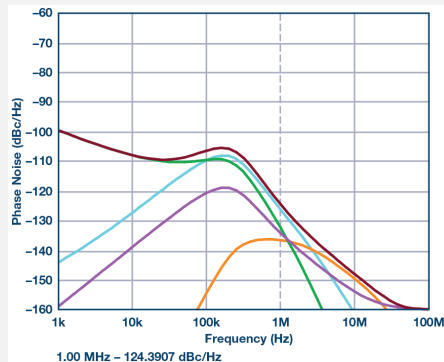
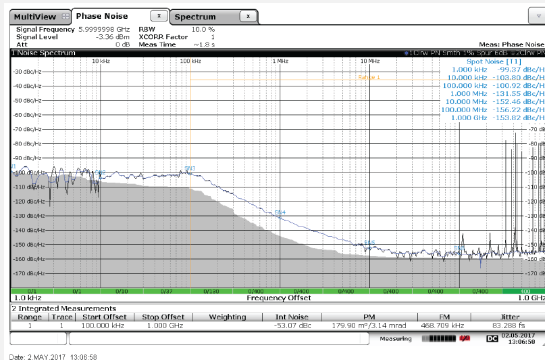
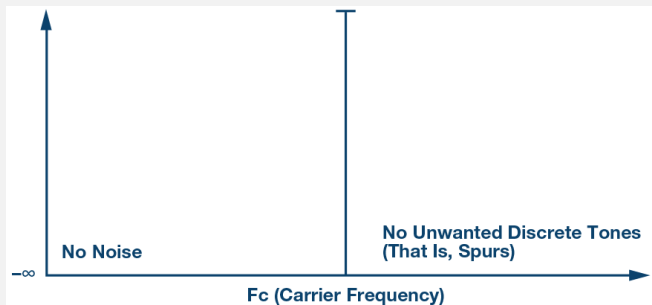
相位噪声是指单位 1Hz 的噪声谱密度与信号总功率之比，是评价锁相环频率合成器和振荡器频谱纯度的重要指标，是信号在频域的度量，在时间域里为时钟抖动。

### [2] 杂散

锁相环中的杂散主要为参考杂散和小数杂散。参考杂散主要由电荷泵交替电流（源电流与汇电流）的失配、电荷泵漏电流和电源退耦不够而引起的。漏电流引起的参考杂散在鉴相频率较低时占主要作用；交替电流引起的参考杂散在鉴相频率较高时占主要作用；输出高阻态时，漏电流是杂散的主要来源。

### [3] 锁定时间

锁定时间是锁相环从一个频率跳变到另一个频率所用的时间。



# Part 3 核心器件

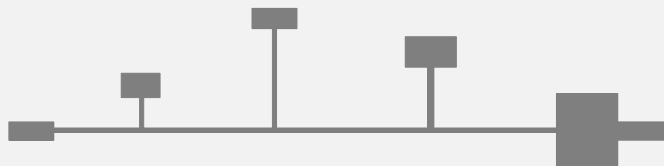
# 零中频接收机系统设计技术

## 滤波器

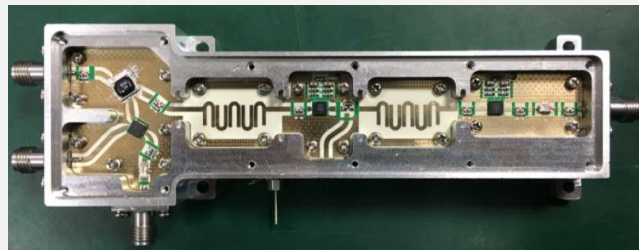
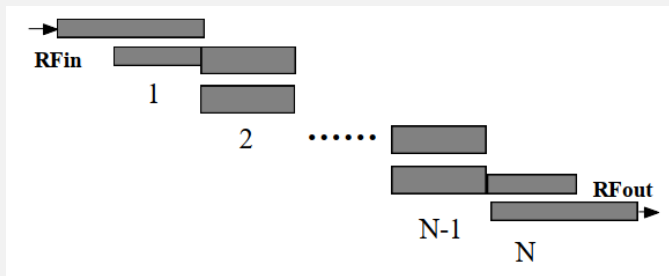
### 滤波器方案

低频采用LC型滤波器(<100MHz)

在毫米波频段, 需要使用微带滤波器, 常用的滤波器方案主要有平行耦合滤波器, 高低阻抗滤波器, 交指滤波器, 梳状滤波器等



椭圆函数微带低通滤波器

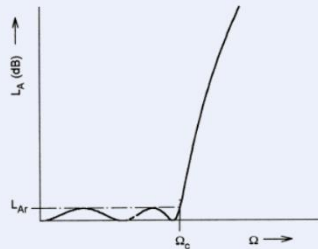


# 零中频接收机系统设计技术

## 滤波器

### 低频LC滤波器方案

建议采用切比雪夫或椭圆函数原型滤波器



切比雪夫滤波器为高Q值滤波器，应用场景包括：[1]阻带下降较陡；[2]允许带内有纹波，与巴特沃斯相比有更好的频率选择性。

衰减函数：

$$A_{dB} = 10 \lg[1 + \varepsilon^2 T_n^2(\Omega)], \quad \varepsilon = \sqrt{10^{R_{dB}/10} - 1}$$

$$T_n(x) = \begin{cases} (-1)^n \operatorname{ch}(n \times \operatorname{arccch} |x|) & x < -1 \\ \cos(n \times \arccos x) & -1 < x < 1 \\ \operatorname{ch}(n \times \operatorname{arccch} x) & x > 1 \end{cases}$$

滤波器阶数：

$$n \geq \frac{\arccos \left[ \sqrt{\frac{10^{0.1L_{AS}} - 1}{10^{0.1L_{Ar}} - 1}} \right]}{\arccos(\Omega_s)}$$

低通原型滤波器元件值：

$$g_1 = \frac{2A_1 \alpha}{\gamma}$$

$$g_K = \frac{4A_{K-1}A_K \alpha^2}{g_{K-1} \cdot B_{K-1}}, \quad K = 2, 3, \dots, n$$

其中：

设  $x = \cos \theta$ ，则

$$T_n(x) = \cos(n\theta) \quad (0 \leq \theta \leq \pi)$$

$$T_0(x) = \cos(0) = 1$$

$$T_1(x) = \cos(\arccos x) = x$$

$$T_2(x) = \cos(2\arccos x) = 2x^2 - 1$$

$$T_3(x) = \cos(3\arccos x) = 4x^3 - 3x$$

$$\alpha = \cosh \left\{ \frac{1}{N} \cosh^{-1} \left[ \frac{1}{\varepsilon} \right] \right\}$$

$$\beta = \ln \left[ \coth \frac{rp}{17.37} \right], \quad \gamma = \sinh \frac{\beta}{2N}$$

$$A_K = \sin \frac{(2K-1)\pi}{2N}, \quad K = 1, 2, \dots, N$$

$$B_K = \gamma^2 + \sin^2 \left( \frac{K\pi}{N} \right)$$

# 零中频接收机系统设计技术

## 切比雪夫滤波器衰减特性

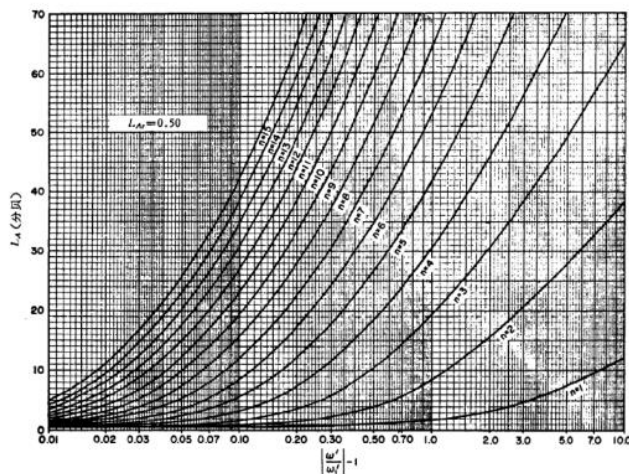


图 2.6-4 0.50 分贝波纹的切比雪夫低通滤波器的阻带衰减特性

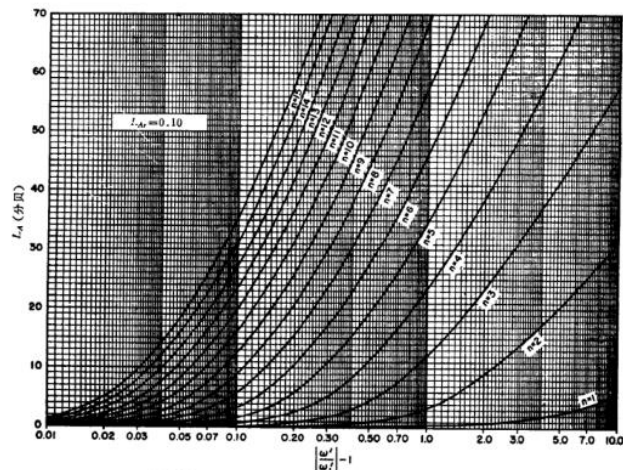


图 2.6-2 0.10 分贝波纹的切比雪夫低通滤波器的阻带衰减特性

### 0.1 分贝波纹

n 值	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	$\epsilon_7$	$\epsilon_8$	$\epsilon_9$	$\epsilon_{10}$	$\epsilon_{11}$
0.5 分贝波纹											
1	0.6986	1.0000									
2	1.4029	0.7071	1.9841								
3	1.5963	1.0967	1.5963	1.0000							
4	1.6703	1.1926	2.3661	0.8419	1.9841						
5	1.7058	1.2296	2.5408	1.2296	1.7058	1.0000					
6	1.7254	1.2479	2.6064	1.3137	2.4758	0.8696	1.9841				
7	1.7372	1.2583	2.6381	1.3444	2.6381	1.2583	1.7372	1.0000			
8	1.7451	1.2647	2.6564	1.3590	2.6964	1.3389	2.5093	0.8796	1.9841		
9	1.7504	1.2690	2.6678	1.3673	2.7239	1.3673	2.6678	1.2690	1.7504	1.0000	
10	1.7543	1.2721	2.6754	1.3725	2.7392	1.3806	2.7231	1.3485	2.5239	0.8842	1.9841

1	0.3052	1.0000									
2	0.8430	0.6220	1.3554								
3	1.0315	1.1474	1.0315	1.0000							
4	1.1088	1.3061	1.7703	0.8180	1.3554						
5	1.1468	1.3712	1.9750	1.3712	1.1468	1.0000					
6	1.1681	1.4039	2.0562	1.5170	1.9029	0.8618	1.3554				
7	1.1811	1.4228	2.0966	1.5733	2.0966	1.4228	1.1811	1.0000			
8	1.1897	1.4346	2.1199	1.6010	2.1699	1.5640	1.9444	0.8778	1.3554		
9	1.1956	1.4425	2.1345	1.6167	2.2053	1.6167	2.1345	1.4425	1.1956	1.0000	
10	1.1999	1.4481	2.1444	1.6265	2.2253	1.6418	2.2046	1.5821	1.9628	0.8853	1.3554

# 零中频接收机系统设计技术

## 切比雪夫低通滤波器设计实例

例：设计一个带内纹波为0.1dB，源端和终端阻抗为 $50\Omega$ ，截止频率为1GHz，且在2GHz至少有30dB衰减的切比雪夫原型滤波器？

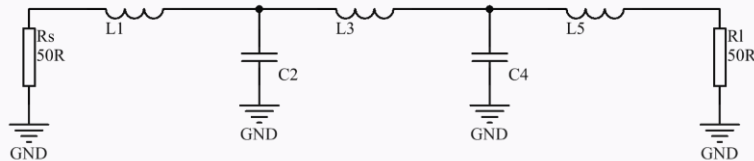
<1>分析滤波器阶数

采用阻带衰减频率值和截止频率关系进行：

$$f' = f_s/f_c - 1 = 2\text{GHz}/1\text{GHz} - 1 = 1$$

根据切比雪夫衰减响应曲线 $f_s/f_c - 1 = 1$ 时， $n=5$ 时， $A > 30\text{dB}$ ，因此滤波器阶数 $n=5$

<2>设计滤波器拓扑结构



<3>通过查表获得归一化元件值

$$g_1 = 1.1468, \quad g_2 = 1.3712, \quad g_3 = 1.9750, \quad g_4 = 1.3712, \quad g_5 = 1.1468$$

# 零中频接收机系统设计技术

## 低通原型滤波器反归一化

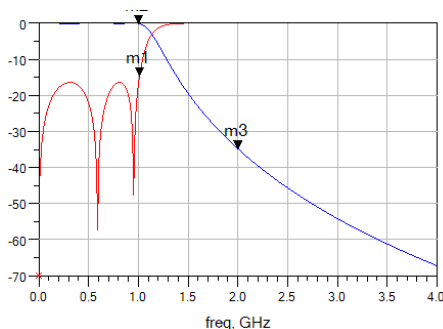
滤波器的反归一化是指低通原型滤波器到真实滤波器参数值的过程，本质为将归一化值转为实际的电感和电容值。

$$L = \frac{Z_0 g_L}{2\pi f_c}$$

$$C = \frac{g_C}{2\pi f_c Z_0}$$

例1：设计一个带内纹波为0.1dB，源端和终端阻抗为 $50\Omega$ ，截止频率为1GHz，且在2GHz至少有30dB衰减的切比雪夫滤波器？

例2：设计一个截止频率为50MHz，且在150MHz至少有50dB衰减的巴特沃斯滤波器



例1：  $g_1=1.1468$ ,  $g_2=1.3712$ ,  $g_3=1.9750$ ,  $g_4=1.3712$ ,  $g_5=1.1468$ ,

反归一化：  $L_1=L_5=(50*1.1468)/(2*3.14*1*10^9)=9.1\text{nH}$ ;

$C_2=C_4=1.3712/(2*3.14*10^9*50)=4.36\text{pF}$ ;

$L_3=(50*1.9750)/(2*3.14*1*10^9)=15.7\text{nH}$

# 零中频接收机系统设计技术

## 放大器

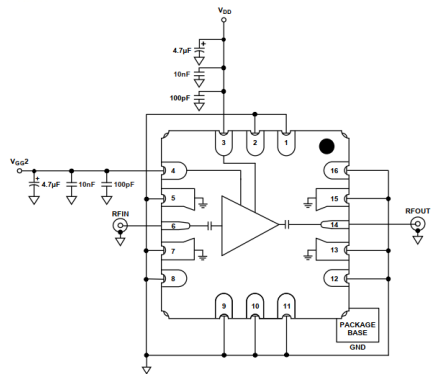
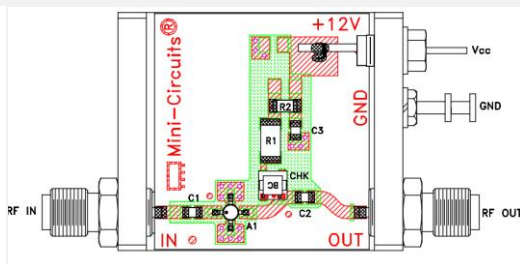
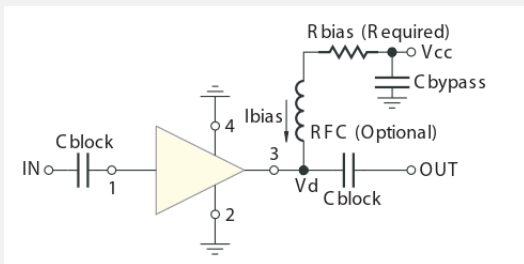
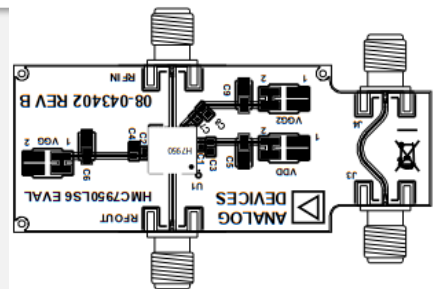
### 低噪声放大器方案

根据总体设计需求确认增益、噪声和功率容量要求。

采用晶体管和集成芯片方案进行设计。

基于晶体管设计(有较高的灵活度):

可以自由控制LNA的噪声系数和增益,可以根据项目的实际需要确定指标;





# 零中频接收机系统设计技术

## 混频器

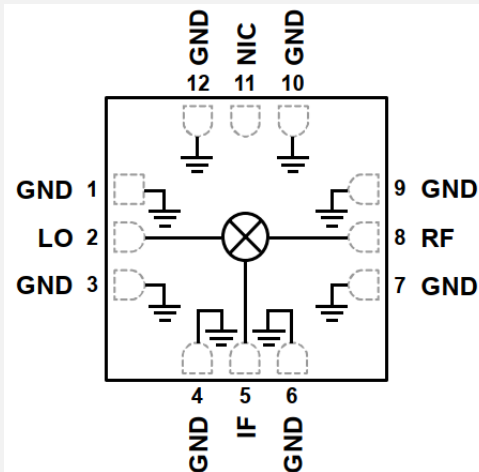
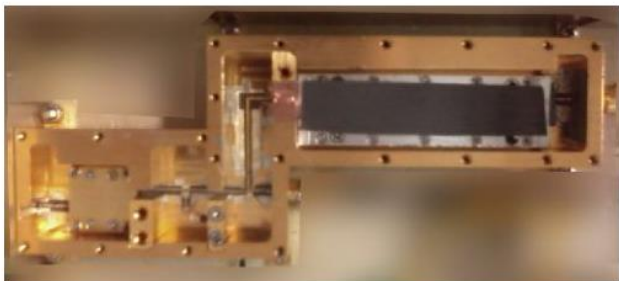
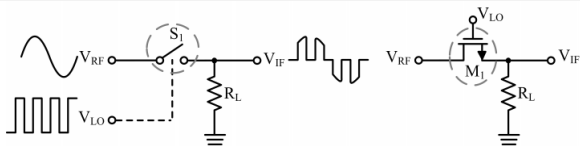
### 物理本质

频率搬移的本质就是使用一个频率信号去开关另一个频率信号。

### 接收机混频器方案

对于低噪声要求，建议采用无源混频器方案设计。

对于微波集成芯片，裸片频率特性优于带封装的芯片；



# Part 4 接收机系统设计与链路设计

# 零中频接收机系统设计技术

## 项目演示

### 设计板级GPS L1频段的近零中频接收机系统

#### 要求:

接收机输入频率为1575.42MHz, 输出IQ中频信号, 详细指标要求如下:

IQ调制: IQ调制就是数据分为两路, 分别进行载波调制, 两路载波相互正交, I是in-phase (同相), q是quadrature (正交)。

输入频率	GPS L1 1575.42MHz
输入功率范围	-85dBm~-60dBm
系统增益	>60dB
噪声系数	<3.5dB
中频频率	512KHz
带宽	3MHz
增益动态范围	0-30dB
镜像抑制	>45dB

**增益实现:** 分别在RF级和基带级实现增益, RF级定增益为20dB; 基带级定增益>40dB, 基带级的增益范围定位0-30dB;

**噪声系数:** 选择无源混频器, 和噪声系数较低的LNA方案;

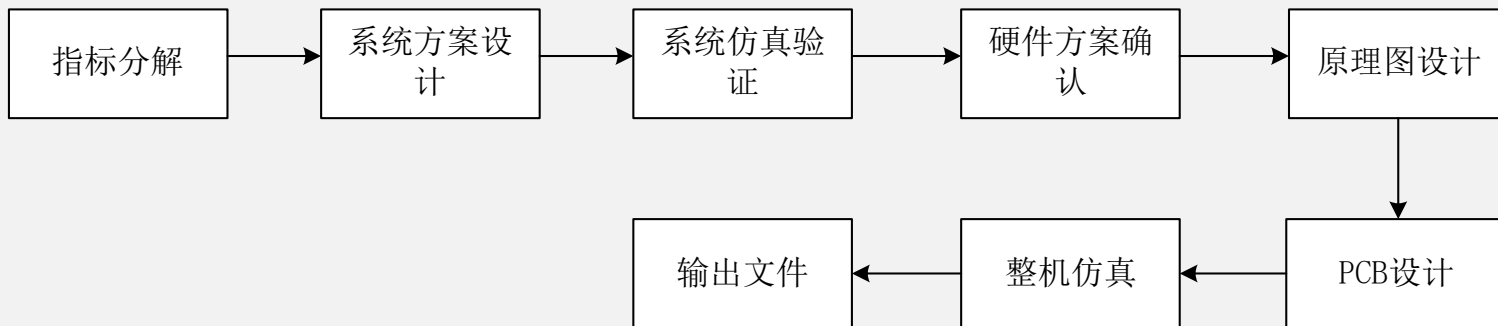
**杂散抑制:** 主要基于滤波器实现, 分别在射频级和基带级增加滤波器, RF级使用LTCC或者SAW滤波器方案, 基带级频率为512K, 选择LC滤波器方案。

**混频器方案:**

使用差分输出形式的混频器, 基带端使用差分放大器。

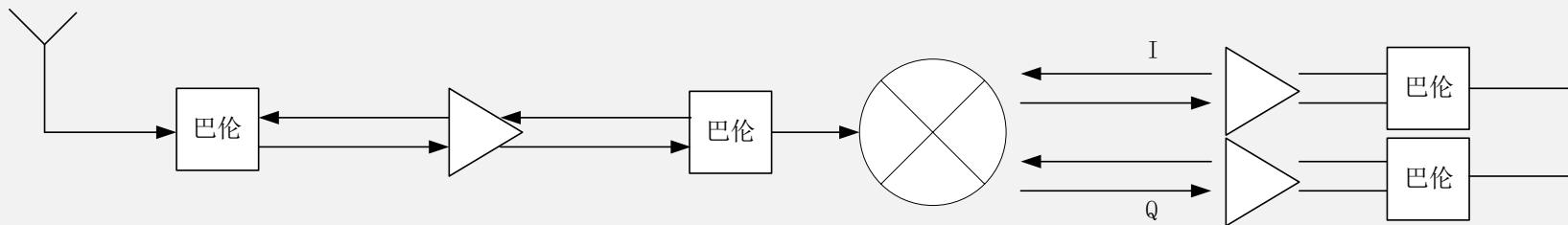
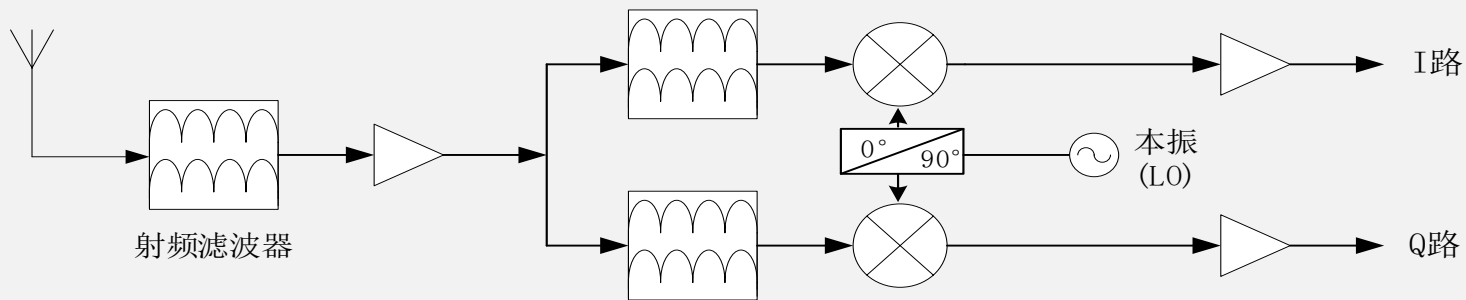
# 零中频接收机系统设计技术

## 项目演示



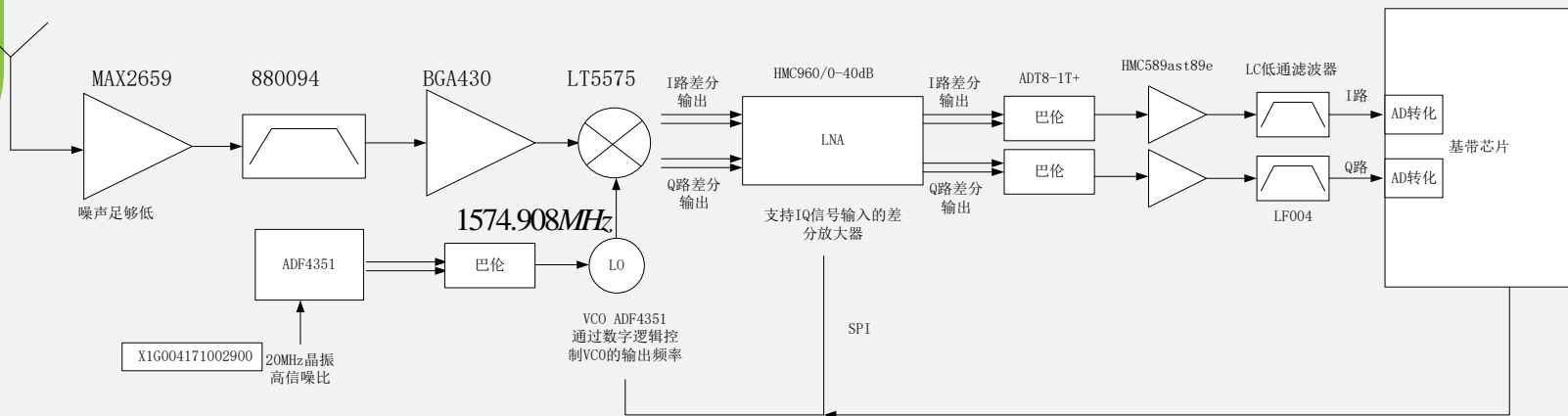
# 零中频接收机系统设计技术

## 项目演示



# 零中频接收机系统设计技术

## 整机方案



输入频率	GPS L1 1575.42MHz
输入功率范围	-85dBm-60dBm
系统增益	>60dB
噪声系数	<3.5dB
中频频率	512KHz
带宽	3MHz
增益动态范围	0-30dB
镜像抑制	>45dB

本振的选择：使用低本振方案，产生的谐波频率远高于中频频率，因此增加滤波器可以消除；

$$\text{中频频率的设计: } f_{IF} = f_{RF} - f_{LO} \Rightarrow f_{LO} = f_{RF} - f_{IF} = 1575.42\text{MHz} - 0.512\text{MHz} = 1574.908\text{MHz}$$

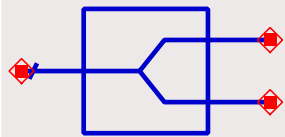
# 板级收发机系统设计

## 系统仿真

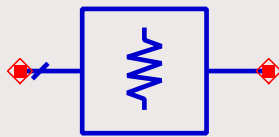
### 接收机系统

基于ADS理想器件的仿真

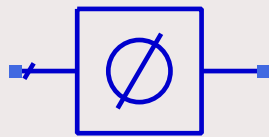
- [1] 确定总的增益;
- [2] 确定输入和输出功率;
- [3] 分析总体噪声;
- [4] 通道的增益预算与补偿方案确定。



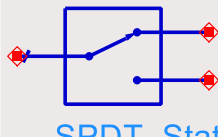
PwrSplit2  
PWR1  
S21=0.707  
S31=0.707



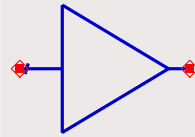
Attenuator  
ATTEN4  
Loss=0 dB  
VSWR=1



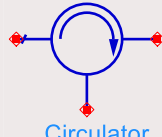
PhaseShiftSML  
PS1  
Phase=0  
ZRef=50. Ohm



SPDT\_Static  
SWITCH3  
State=1  
Loss1=0. dB  
VSWR1=1.  
Isolat=100 dB



Amplifier2  
AMP5  
S21=dbpolar(0,0)  
S11=polar(0,0)  
S22=polar(0,180)  
S12=0

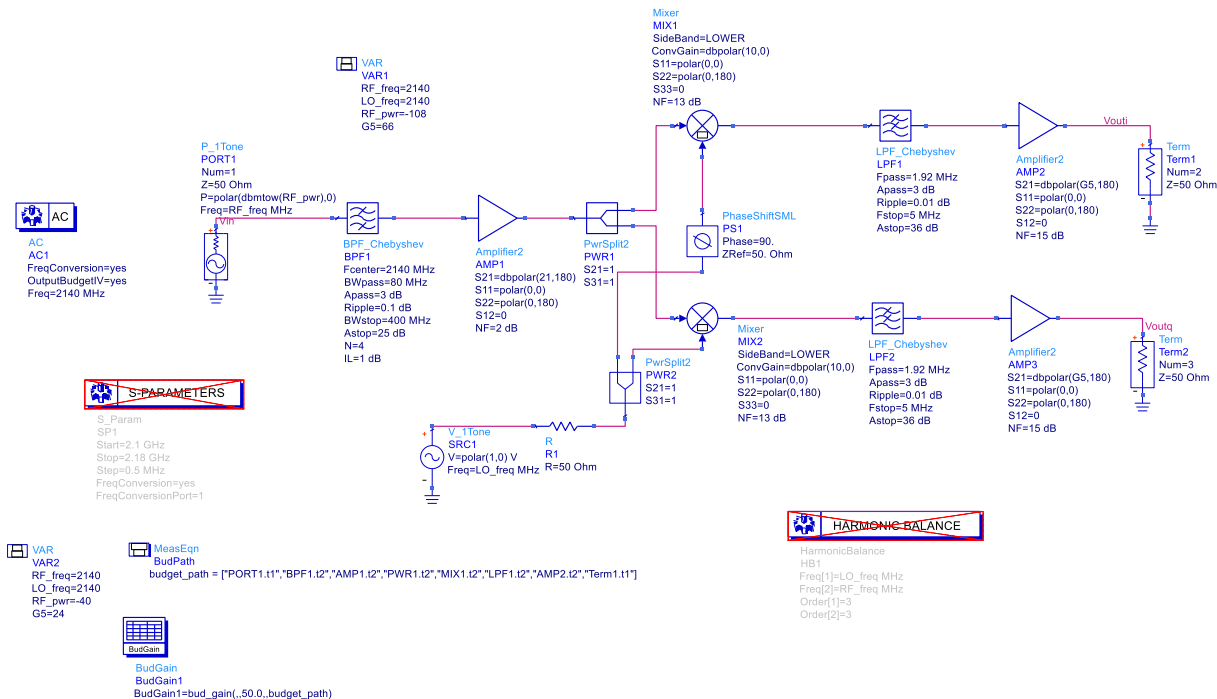


Circulator  
CIR1  
Loss1=0. dB  
VSWR1=1.  
Isolat=100. dB  
Z1=  
Z2=  
Z3=

# 板级收发机系统设计

## 系统仿真

### ADS基于AC仿真器库中增益预算设置







**THANK YOU !!**