

射频特训班



凡亿教育®
WWW.FANYEDU.COM

WWW.FANYEDU.COM



第五讲 S波段IQ调制收发机设计技术

主讲：汪 朋

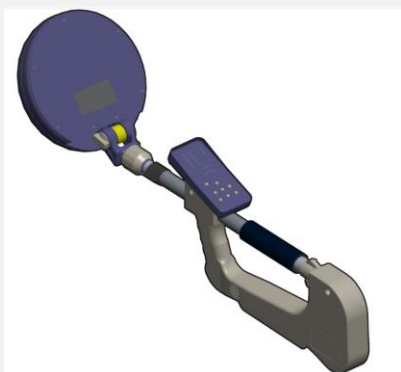
QQ: 3180564167

S波段IQ调制发射机设计技术

收发机应用

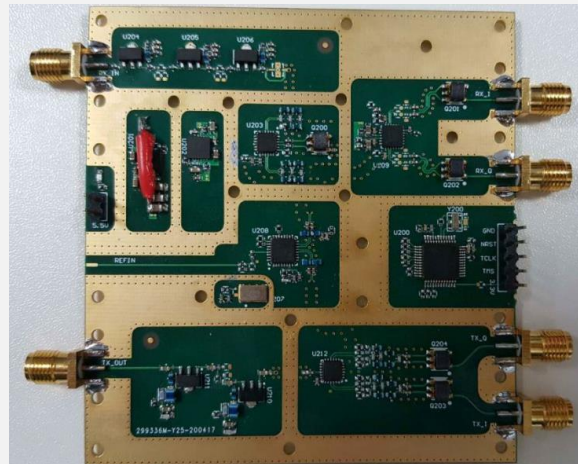
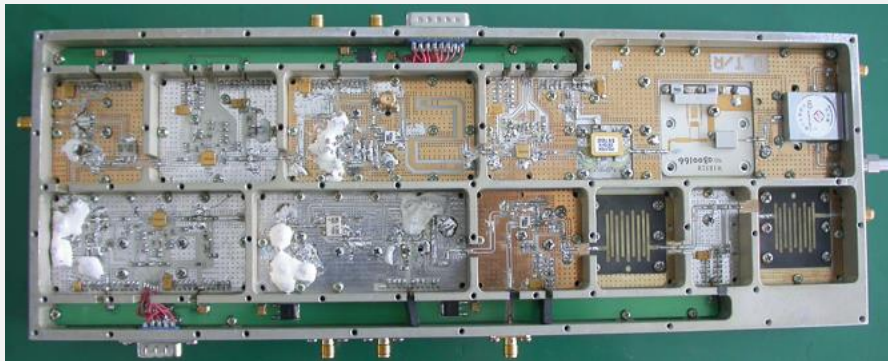
收发机系统组件工程应用

- [1] 相控阵组件;
- [2] 非线性节点检测仪;
- [3] 金属检测仪;
- [4] 探地雷达等;
- [5] 金属检测仪;
- [6] 无人机干扰仪与无人机侦测仪;
- [7] 阻抗检测仪;
- [8] 导弹、机载、星载等雷达组件。



S波段IQ调制发射机设计技术

组件电路
形态



S波段IQ调制发射机设计技术

学会什么?

设计板级S频段的收发机系统

要求:

发射机输入频率为512KHz, 输出频率为 2420 ± 10 MHz, 详细指标要求如下:

基带输入频率	512KHz
输入功率范围	-2dBm-2dBm
系统增益	>45dB
射频输出频率	2420 ± 10 MHz
输出功率	50W
杂散抑制	>45 dBc
谐波抑制	>40 dBc

接收机指标, 输入频率为 2420 ± 10 MHz, 输出频率为512KHz

输入频率	2420 ± 10 MHz
输入功率范围	-90dBm~-60dBm
系统增益	>60dB
射频输出频率	512KHz
输出功率	-10~0dBm
杂散抑制	>45 dBc
谐波抑制	>40 dBc
噪声系数	<5dB

01

收发机架构

02

收发机总体设计

03

收发机详细设计

04

50W级大功率放大器设计技术

05

收发机项目设计演示

Part

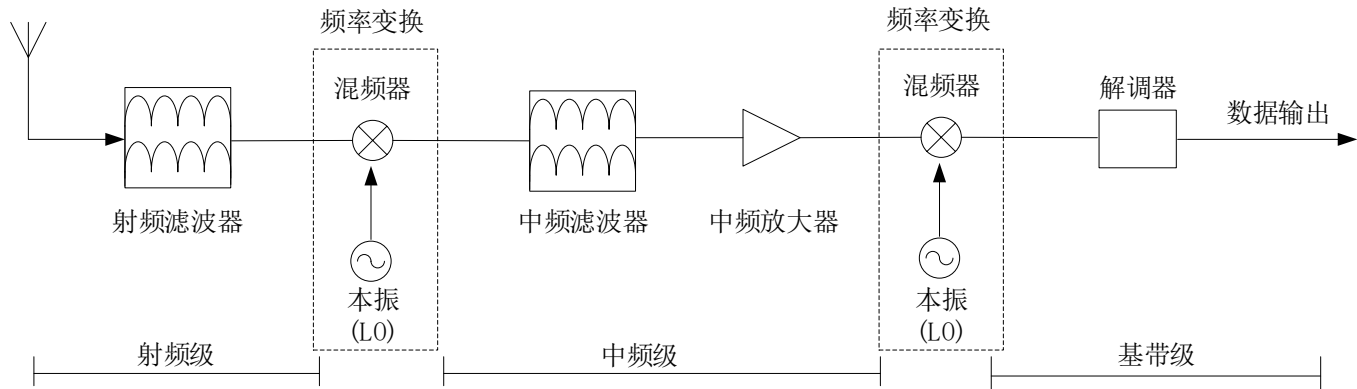
1

发射机与接收机架构

S波段IQ调制发射机设计技术

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。

S波段IQ调制发射机设计技术

优点:

结构简单, 容易集成, 成本较低;

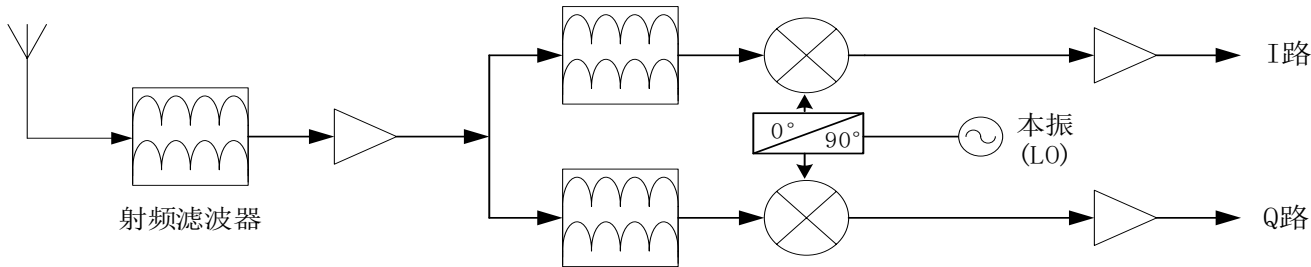
缺点:

[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。

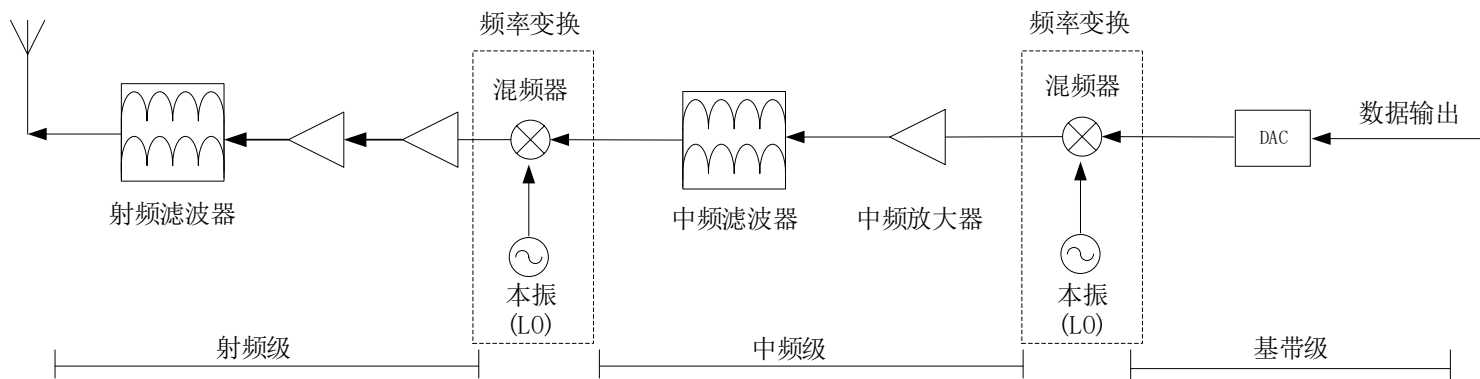


S波段IQ调制发射机设计技术

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，滤波器的设计成本比较高，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;

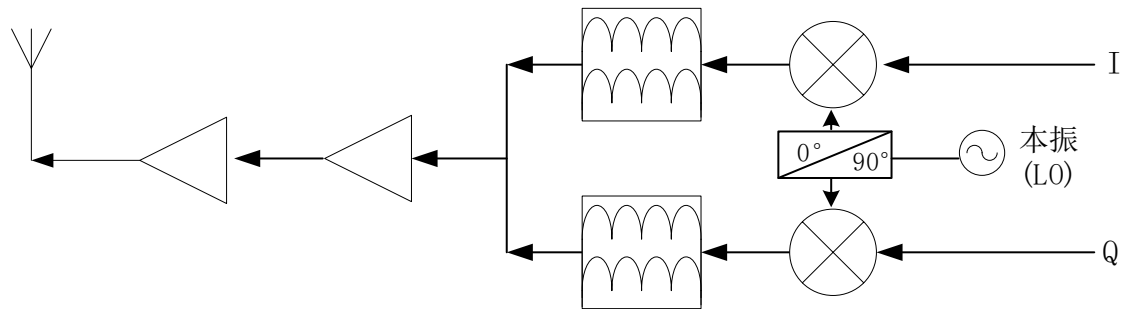
[2] 大功率放大器。

S波段IQ调制发射机设计技术

直接变频发射机

零中频（直接变频）结构的发射机就是通过与混频器混频，直接将基带信号上变频到射频，这样的结构设计可以避免产生镜像抑制的问题。

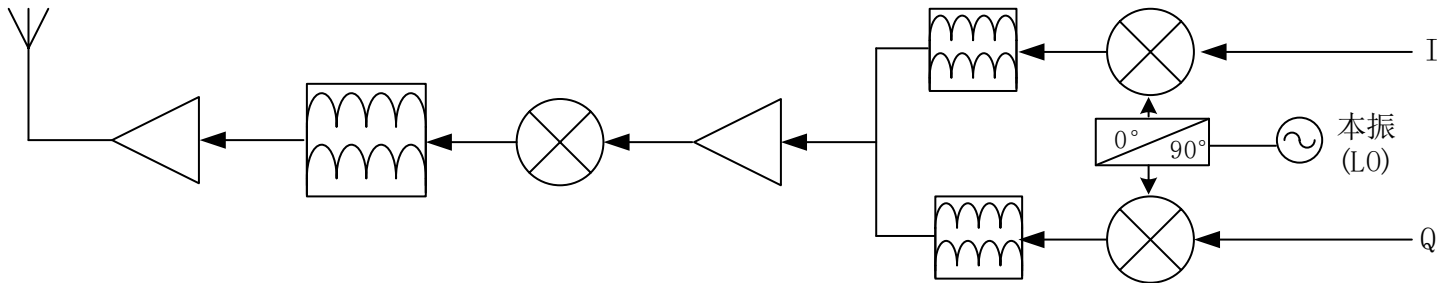
在发射机中，基带信号经过滤波器后直接与混频器混频上变频至射频，再经过放大器将信号进行放大，最后经由带通滤波器消除干扰信号，通过天线发射出去。



S波段IQ调制发射机设计技术

超外差发射机

在超外差式发射机中，基带信号经与混频器混频后上变频至一固定中频信号，通过中频带通滤波器滤除杂波，滤除杂波后的信号经过放大器放大至一定程度后再次与混频器进行混频，混频后的信号变频为射频信号。



S波段IQ调制发射机设计技术

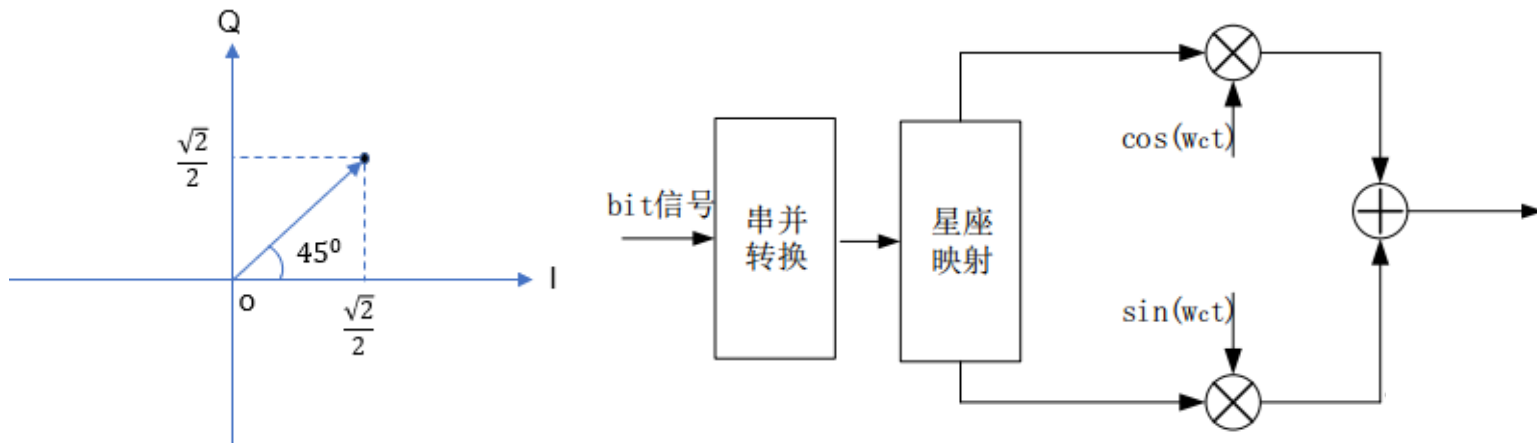
IQ调制

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



S波段IQ调制发射机设计技术

收发机主要指标

接收机关键指标

[1] 工作频率与工作带宽;

[2] 接收灵敏度

灵敏度反映的是接收机接收微弱信号的能力，影响接收机灵敏度的因素主要有两个，分别是噪声和接收机整体的信噪比；

[3] 噪声系数

接收电路中的噪声来源可以分为内部噪声和外部噪声两方面，外部噪声是天线从外部接收到的噪声，内部噪声的来源则是接收系统内的各个器件；

[4] 动态范围；

[5] 谐波抑制比；

[6] 噪声抑制比；

[7] 频率隔离度与通道隔离度。

发射机关键指标

[1] 工作频率与工作带宽; [2] 发射功率; [3] 发射效率; [4] 邻信道功率比; [5] 谐波抑制比; [6] 噪声抑制比;

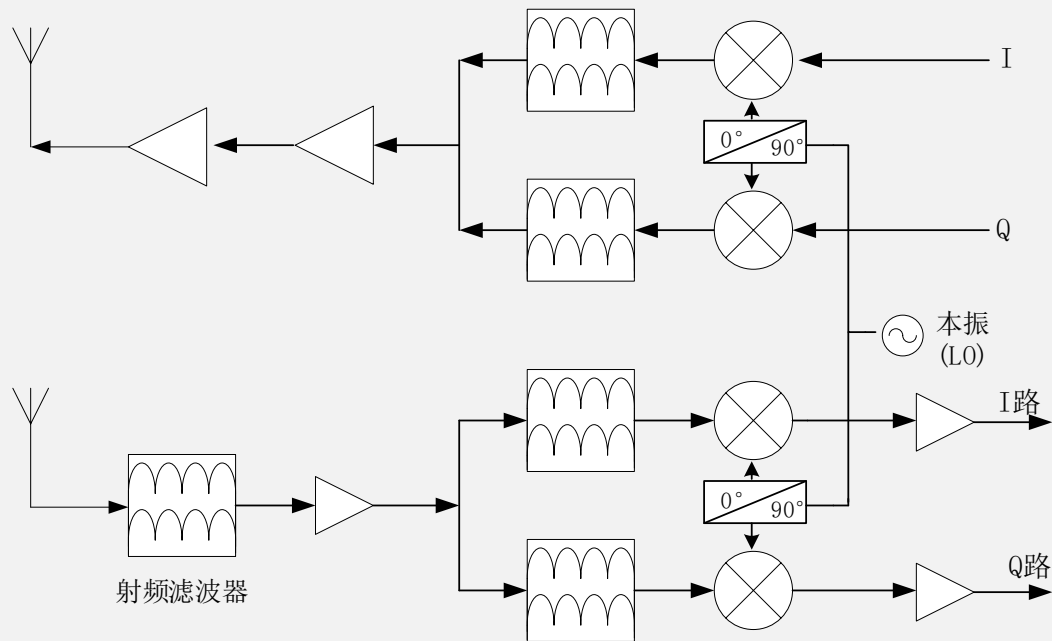
[7] 频率隔离度与通道隔离度。

Part 2 收发机总体设计

S波段IQ调制发射机设计技术

整机架构

整机系统架构与方案设计



Part 3 收发机详细设计

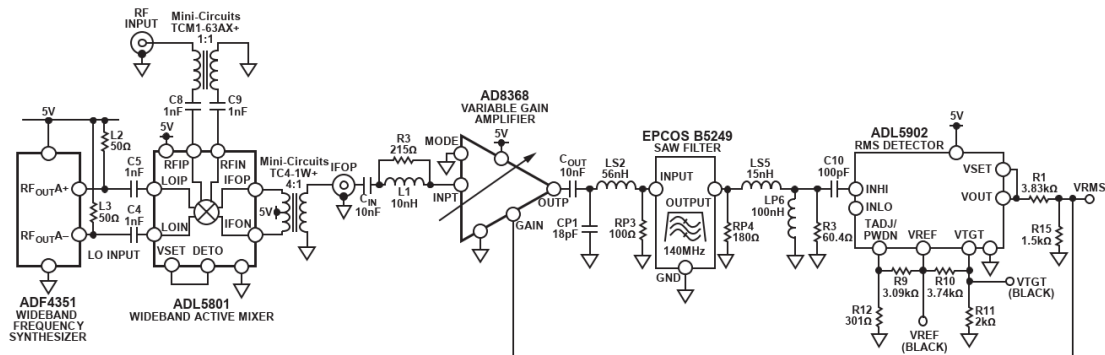
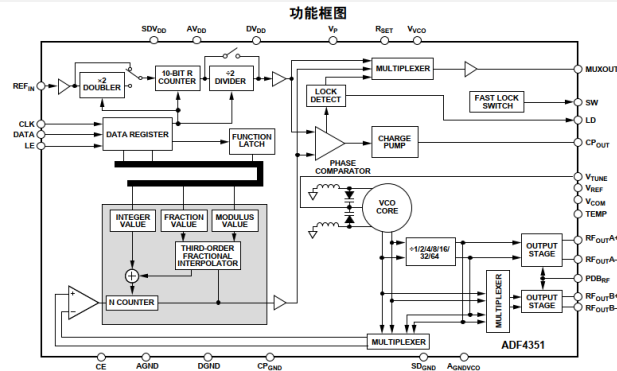
S波段IQ调制发射机设计技术

LO设计

锁相环方案

高本振设计:

ADF4351



S波段IQ调制发射机设计技术

滤波器设计

包括基带，中频和射频三类滤波器

- [1] 基带级中心频段为40MHz以下，建议采用LC滤波器设计；
- [2] 射频频段为S波段，可以采用介质滤波器、LTCC或者微带滤波器方案，必须要有足够高的谐波抑制能力和功率容量；

Surface Mount Bandpass Filter

50Ω 30 to 88 MHz

BPF-C59+



Generic photo used for illustration purposes only
CASE STYLE: HU1196

The Big Deal

- Low insertion loss
- Broader bandwidth
- High Rejection
- Wide stopband
- Miniature shielded package

LTCC Bandpass Filter

BFCN-2275+

50Ω 2170 to 2380 MHz



CASE STYLE: FV1206

The Big Deal

- Small size 3.2mm x 1.6mm
- Pass band (2170-2380 MHz)
- Low Insertion Loss (2.0 dB typical)
- Sharp rejection peaks close to stop band

LTCC Bandpass Filter

BFCN-3115+

50Ω 2720 to 3570 MHz



CASE STYLE: FV1206

The Big Deal

- Small size 3.2mm x 1.6mm
- Pass band (2720-3570 MHz)
- Low Insertion Loss (1.7 dB typical)

S波段IQ调制发射机设计技术

低噪声放大器

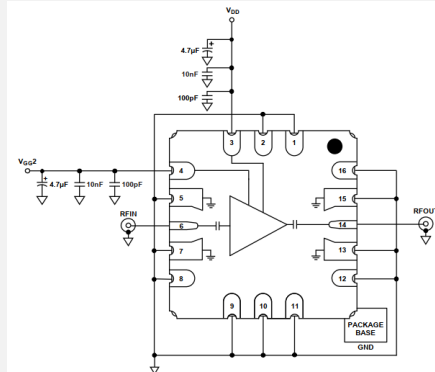
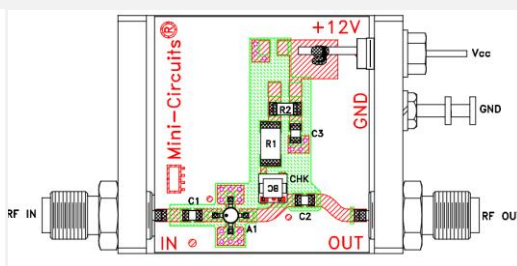
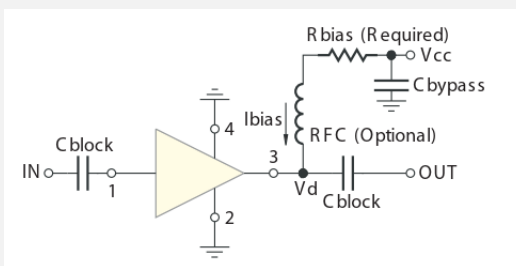
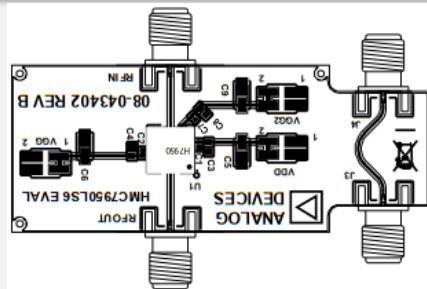
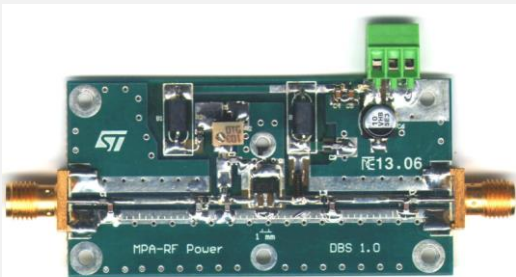
低噪声放大器方案

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):

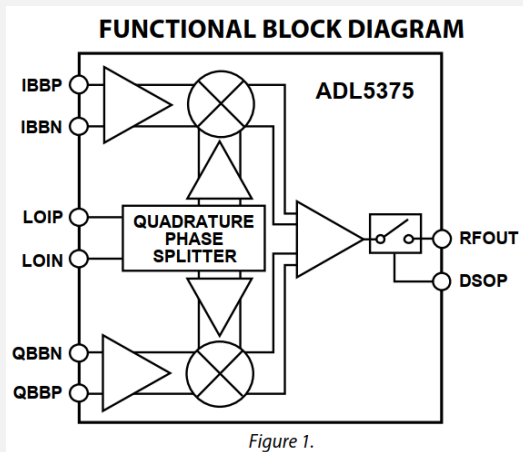
可以自由控制LNA的噪声系数和增益, 可以根据项目的实际需要确定指标;



S波段IQ调制发射机设计技术

发射机正交调制器

正交调制器实现基带信号到射频信号的频率搬移，主要参数包括 工作频率，转换增益，噪声系数，隔离度等，其作用与上变频器类似。



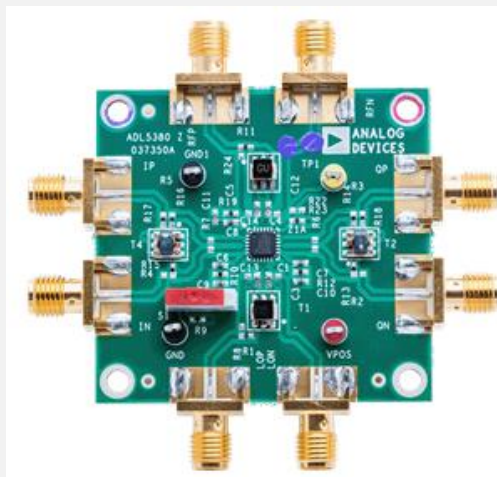
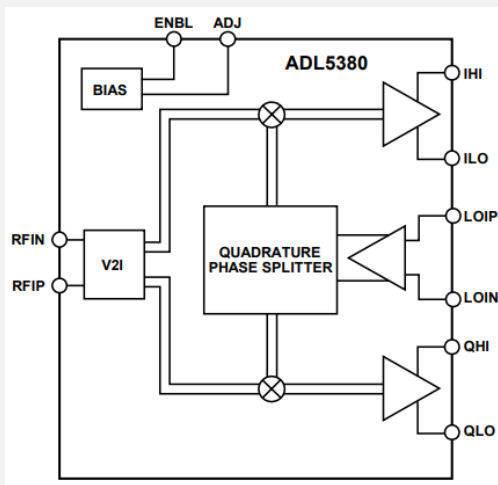
S波段IQ调制发射机设计技术

接收机正交解调器

正交解调器实现射频信号到基带信号的频率搬移，主要参数包括工作频率，转换增益，噪声系数，隔离度等，其作用与下变频器类似。

解调器和下变频器的区别：

解调器能精确地将射频输入信号转换为相应的数字幅度和数字相位，并能实现 0° 到 360° 相位测量，900 MHz时精度为 1° 。

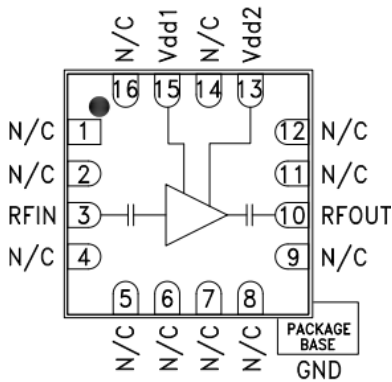


S波段IQ调制发射机设计技术

驱动放大器

驱动放大器强调电流放大或者是电压放大，起桥梁作用。

射频驱动级放大器是放在末级功放前面，对输入信号进行放大，使其达到末级功放要求的输入功率的功率放大器。在发射机的前级电路中，调制振荡电路所产生的射频信号功率很小，需要经过一系列的放大—缓冲级、中间放大级（驱动级放大器）、末级功率放大级，获得足够的射频功率以后，才能馈送到天线上辐射出去。



Parameter	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Units
Frequency Range	5 - 16			16 - 18			GHz
Gain	15	18		12.5	16		dB
Gain Variation Over Temperature		0.02	0.03		0.02	0.03	dB/ °C
Input Return Loss		13			13		dB
Output Return Loss		12			8		dB
Output Power for 1 dB Compression (P1dB)	16.5	19.5		16	19		dBm
Saturated Output Power (Psat)		21			20		dBm
Output Third Order Intercept (IP3)		28			25		dBm
Noise Figure		7			7		dB
Supply Current (Idd)		120	150		120	150	mA

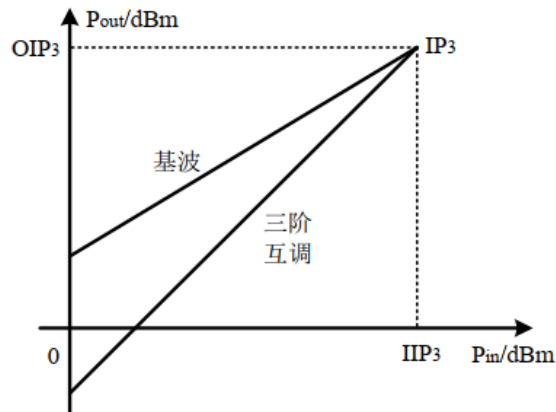
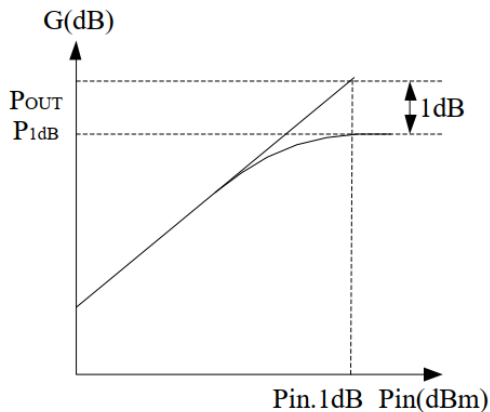
S波段IQ调制发射机设计技术

功率放大器

功率放大器是实现大功率发射信号的关键器件，主要参数包括增益、效率、发射功率、线性度等。

线性度是衡量信号信号质量的主要指标，射频功率放大器的非线性失真会使其产生新的频率分量，如对于二阶失真会产生二次谐波和双音拍频，对于三阶失真会产生三次谐波和多音拍频。

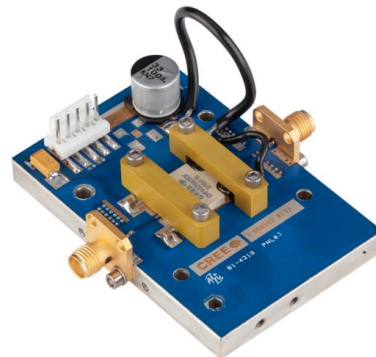
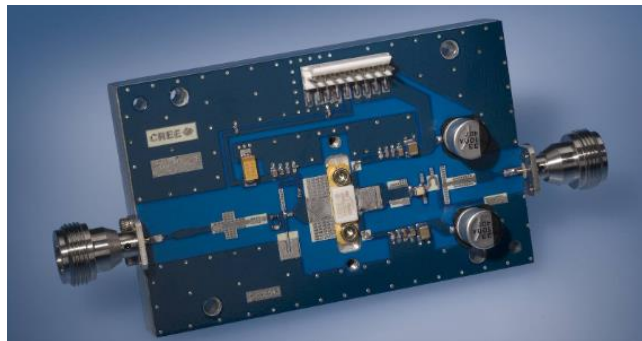
表征功率放大器线性度的重要指标主要为1dB压缩点、三阶互截点、三阶互调。



S波段IQ调制发射机设计技术

功率放大器

在调制器产生射频信号后，射频已调信号就由RF PA将它放大到足够功率，经匹配网络，再由天线发射出去。射频功率放大器的主要技术指标是输出功率与效率，如何提高输出功率和效率，是射频功率放大器设计目标的核心。

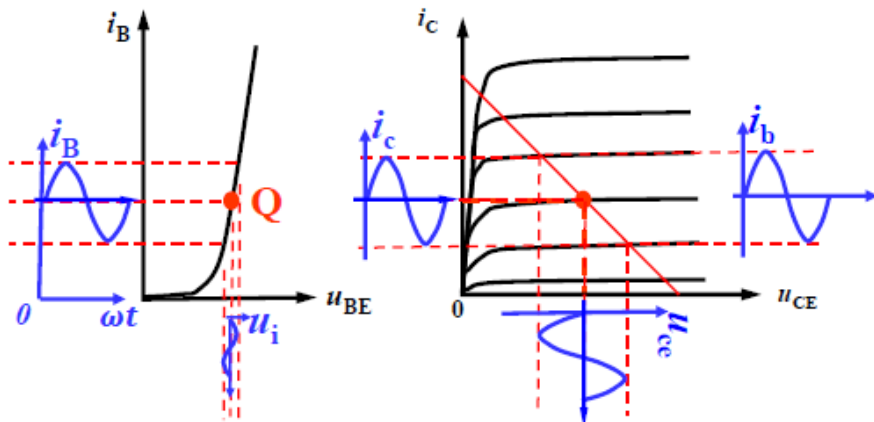
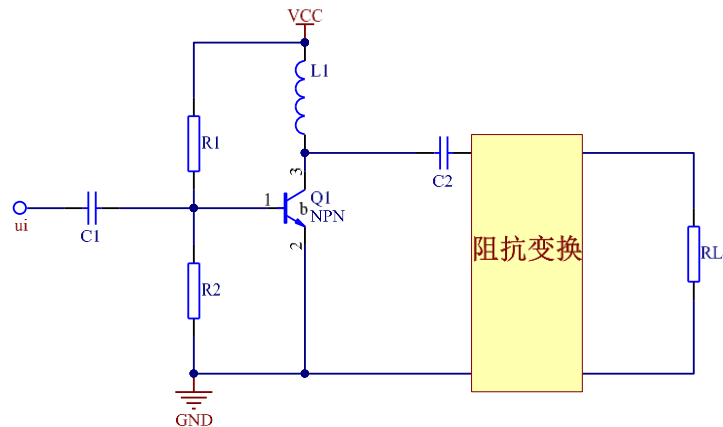


Part 4 50W大功率放大器设计技术

S波段IQ调制发射机设计技术

A类放大器

A 类功率放大器的导通角为 360° ，也就是说整个周期内晶体管都处于导通状态。A 类功率放大器主要工作在线性区域，因此它的线性度好，失真小，噪声小。但缺点是效率不高，热损耗较大，理论效率有 50%，但实际上效率只有不到 30%。



S波段IQ调制发射机设计技术

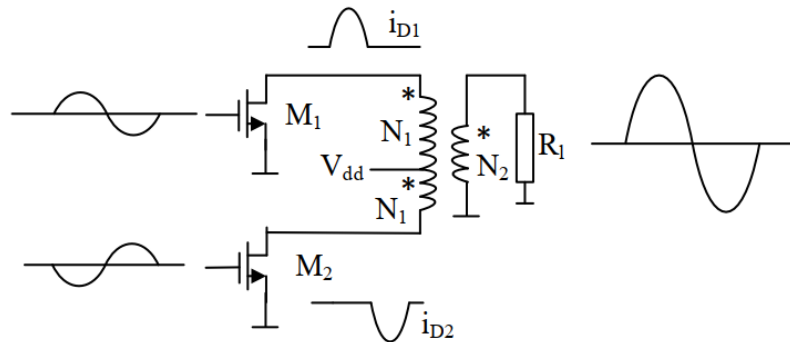
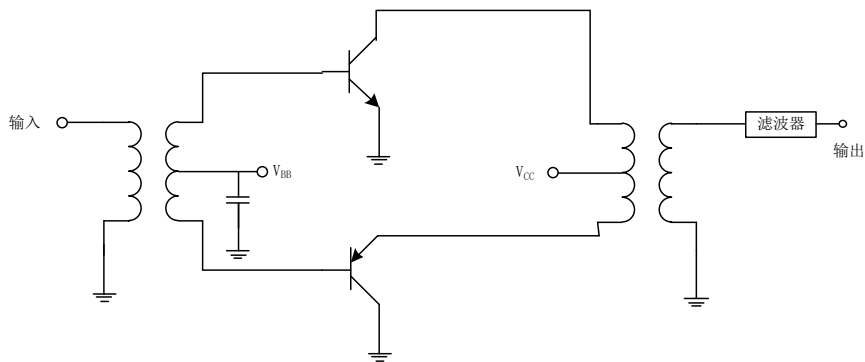
B类放大器

B类放大器的偏置电压设置在截止点，所以 $I_{CQ}=0$ 且 $V_{CSQ}=V_{CE(cutoff)}$ 。

B类功放的导通角为 180° ，其晶体管在导通的半个周期内，产生半个电流正弦波B类放大器理论效率约为78%，但实际工作中一般为60%左右。与A类相比，B类放大器的增益要低一些，驱动电平较高，同时在线性度的表现上也劣于A类。

B类推挽式放大器

若要在整个周期都执行放大功能，必须加上一个在负半周导通的B类放大器。两个一起工作的B类放大器组合，称为推挽式(push-pull)。

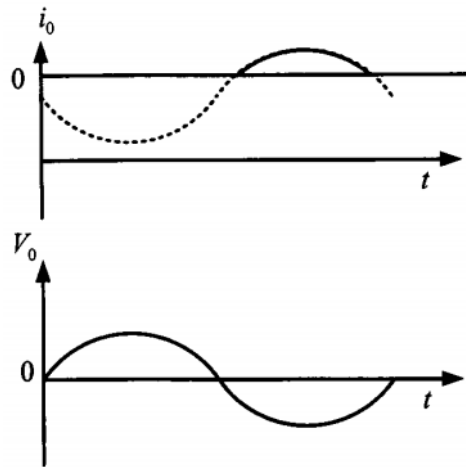
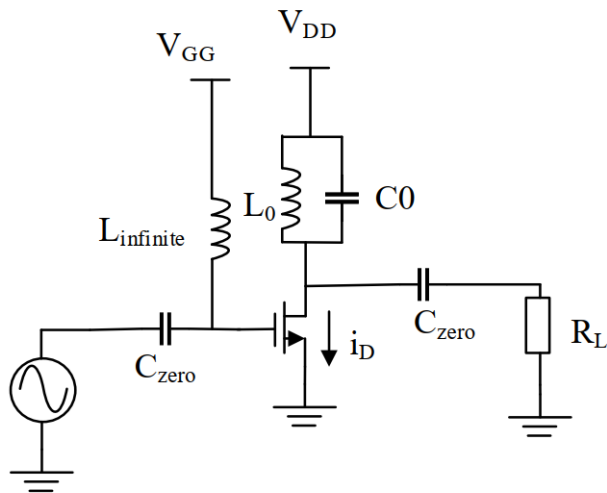


S波段IQ调制发射机设计技术

C类放大器

C类放大器的偏置VGG采用负电压或者低于截止电压。

C类放大器中晶体管工作时间通常小于信号的半个周期，因此C类功放的漏极电流通常近似为周期性的脉冲，为了在输出负载电阻上得到完整的正弦波信号，通常采取在输出端采取并联LC滤波网络的形式。由于C类功率放大器的电压和电流存在不都同时大于零的情况，所以C类功放消耗的直流功率就会比A类和B类功放消耗的功率小，因此C类功放的效率自然也要比A类和B类功放效率高。



S波段IQ调制发射机设计技术

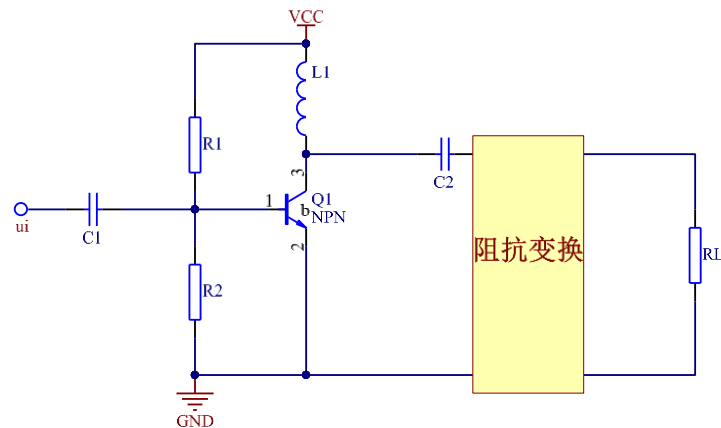
放大器类型

晶体管的基极偏置电压为0.7V

A类放大器设计 $V_B + (-V_a) > 0.7V$

B类放大器: $V_B = 0.7V$

C类放大器: $V_B < 0.7V$ & $V_B + V_A > 0.7V$



S波段IQ调制发射机设计技术

放大器类型

各类射频放大器拓扑比较

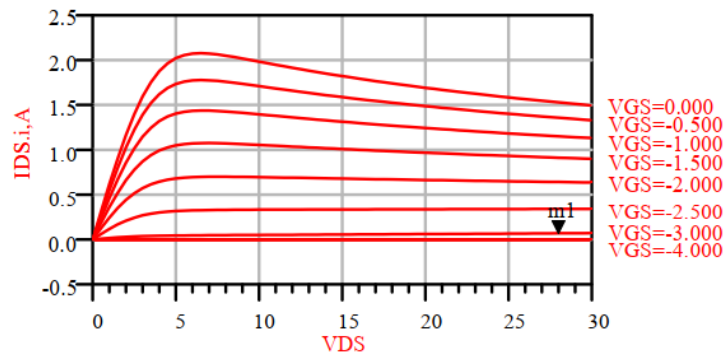
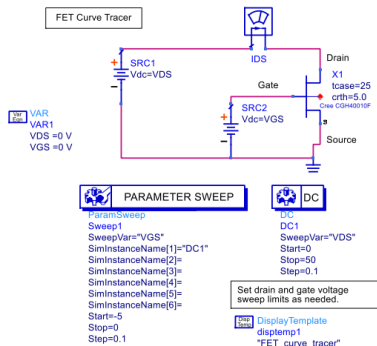
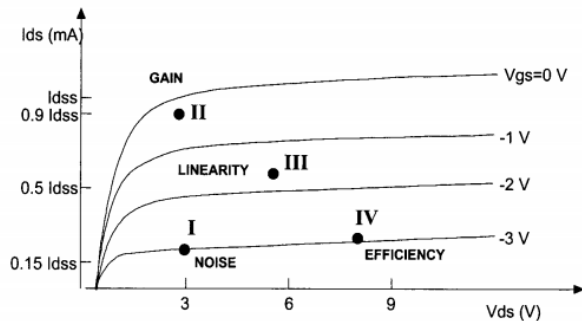
分类	等效模型	导通角	输出功率	理论效率	典型效率	增益	线性度
A	电流源	360°	中等	50%	35%	高	好
B		180°	中等	78.5%	60%	中等	中等
C		<180°	小	100%	70%	低	差
D	开关	180°	大	100%	75%	低	差
E		180°	大	100%	80%	低	差
F		180°	大	100%	75%	低	差

S波段IQ调制发射机设计技术

静态工作点设计

[1] 静态工作点选择

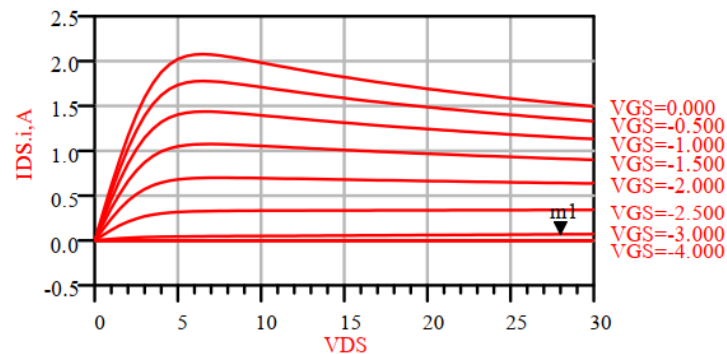
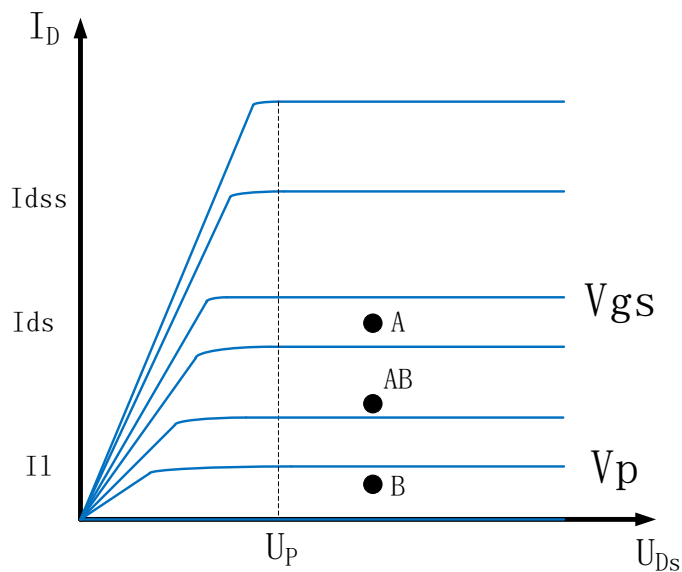
静态工作点的选取需要综合考虑PA的增益、效率、噪声、线性度等主要指标。



S波段IQ调制发射机设计技术

静态工作点设计

[1] 不同类型的放大器静态工作点

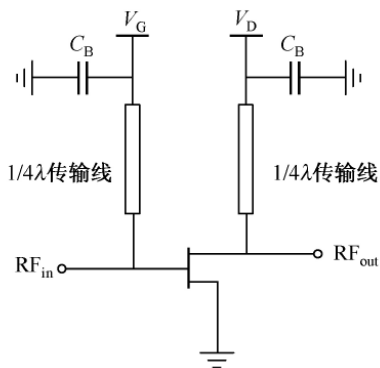
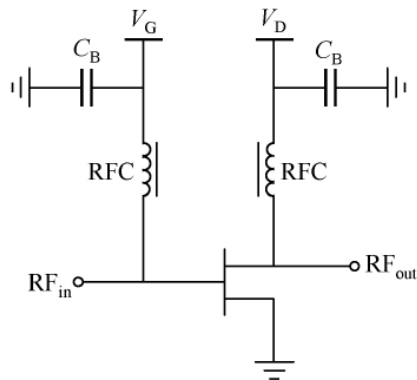


S波段IQ调制发射机设计技术

偏置电路设计

[2] 偏置电路设计

场效应晶体管的偏置网络和双极型晶体管偏置网络的拓扑结构基本相同。由于场效应管的偏置条件许多时候需要负的栅极电压，通常采用双电源供电。



S波段IQ调制发射机设计技术

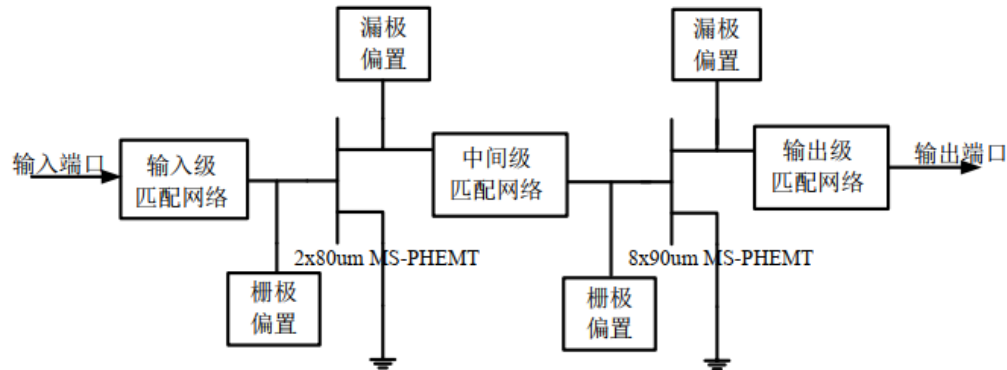
阻抗匹配设计

[3] 阻抗匹配网络设计

<1> 对于PA，其源端通常采用共轭匹配<直接求解输入端口阻抗进行匹配电路设计>;

<2> 负载端采用负载线匹配<通过负载牵引技术求解输出阻抗，而后进行匹配电路的设计>

PA属于大信号放大器，由于晶体管的非线性，随着输入信号功率增大，晶体管进入饱和状态时，其内部的输出阻抗将会发生变化。因此，在设计功率放大器的输出匹配电路时，往往需要根据设计目标的不同将输出端口阻抗匹配到不同的阻抗点。



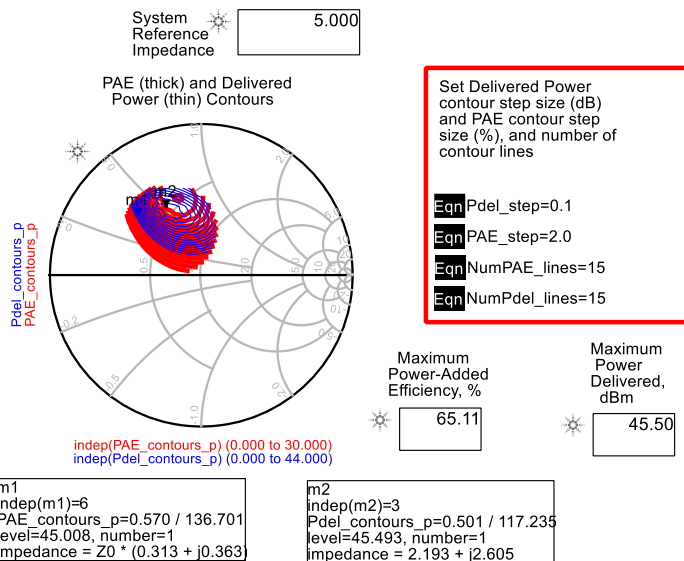
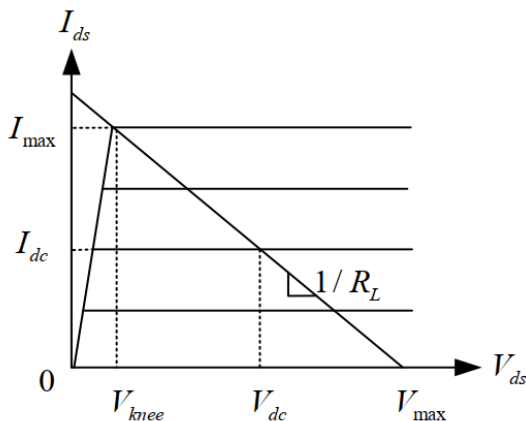
S波段IQ调制发射机设计技术

阻抗匹配设计

[3] 阻抗匹配网络设计

负载牵引

进行负载牵引时，通过不断调节源阻抗调节器和负载阻抗调节器，使晶体管连接各种不同的源阻抗和负载阻抗，同时测量出晶体管在连接不同输入输出阻抗时的输出功率，从而得到某偏置条件下晶体管的一系列输出功率圆，最终找出晶体管的输出功率最大时所对应的最佳源阻抗和最佳负载阻抗。

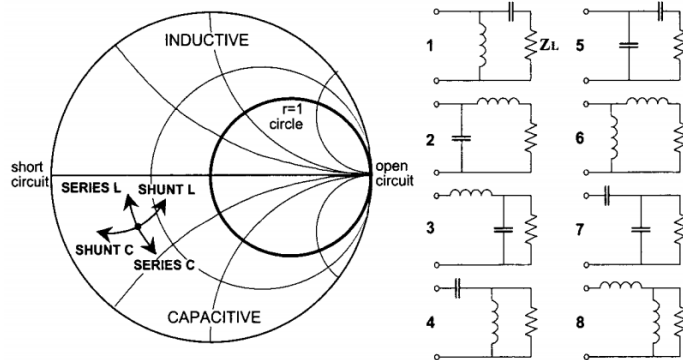
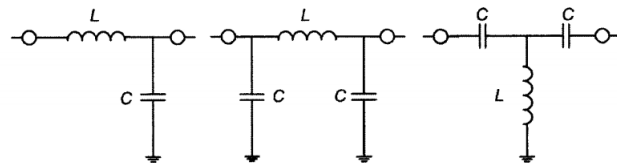
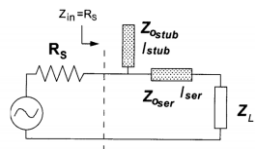
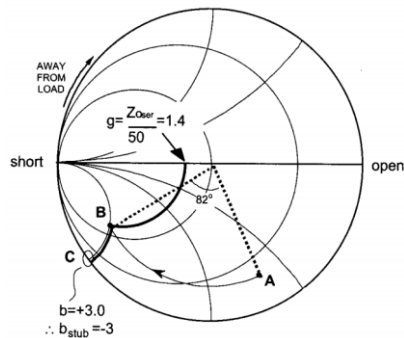
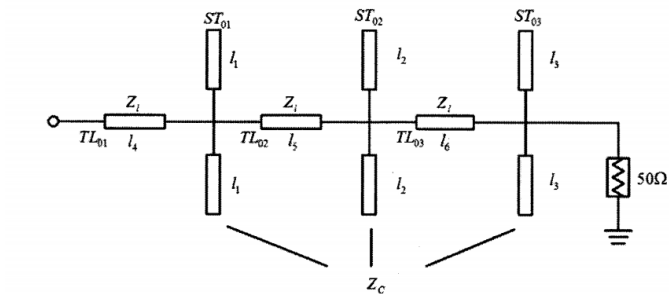


S波段IQ调制发射机设计技术

阻抗匹配设计

[3] 阻抗匹配网络设计

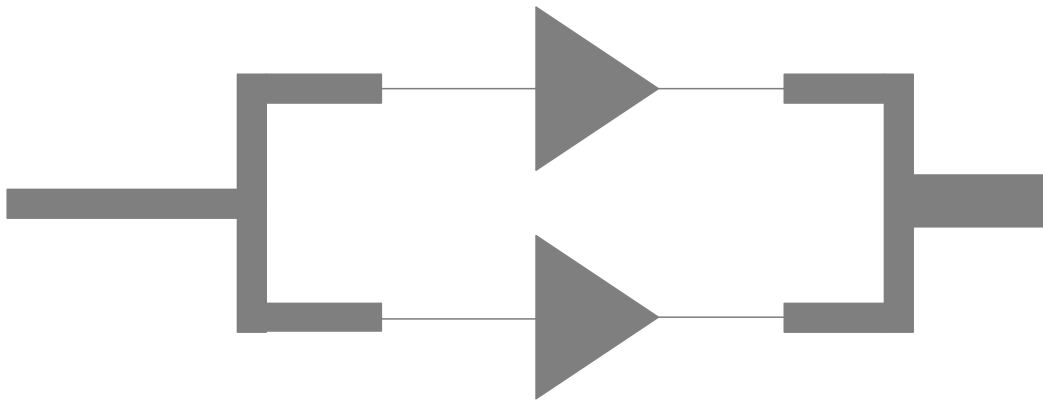
匹配电路类型



S波段IQ调制发射机设计技术

大功率设计思想

功分器合路方案，然后单独获得大功率的输出信号，而后进行合路设计。

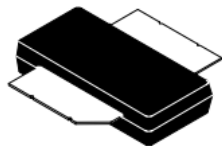


大功率设计思想

S波段IQ调制发射机设计技术

大功率设计思想

大功率功放GaN晶体管

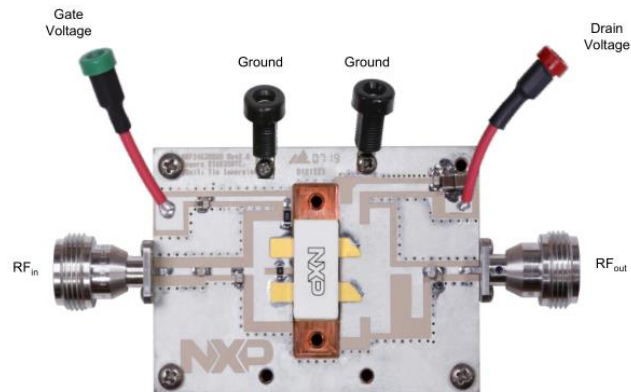
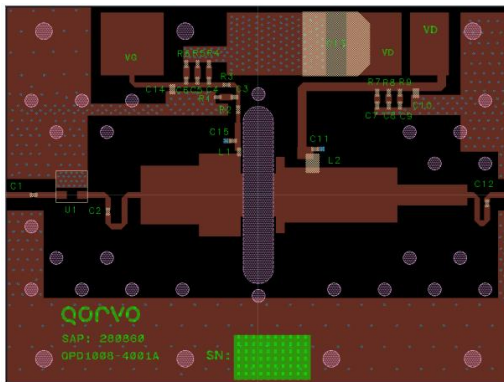


OM-780-2L
PLASTIC

Frequency (MHz)	Signal Type	G _{ps} (dB)	PAE (%)	P _{out} (W)
2400	CW	14.0	61.5	230
2450		13.9	62.0	224
2500		11.5	61.8	214

Load Mismatch/Ruggedness

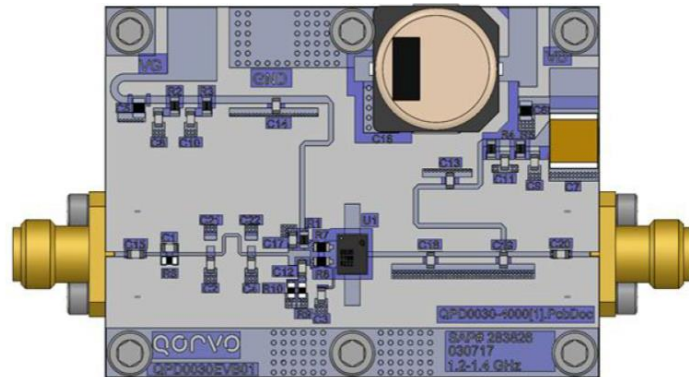
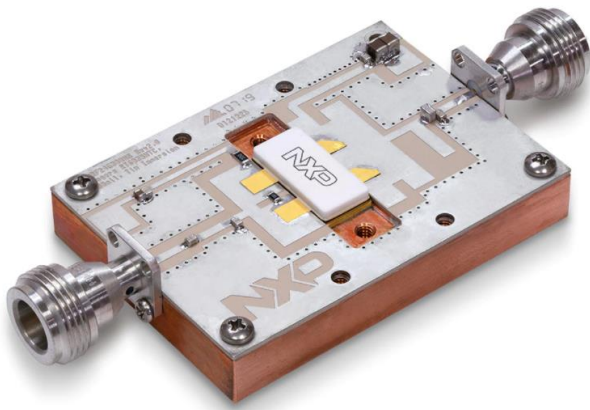
Frequency (MHz)	Signal Type	VSWR	P _{in} (W)	Test Voltage	Result
2450	CW	> 10:1 at all Phase Angles	20 (3 dB Overdrive)	28	No Device Degradation



S波段IQ调制发射机设计技术

大功率设计难点

- [1] 传输线的功率容量控制；
- [2] 器件功率考量；
- [3] 连接器件功率；
- [4] 大功率下散热考量；
- [5] 大功率隔离度控制；
- [6] 射频板材选择。



Part 5 收发机项目设计演示

S波段IQ调制发射机设计技术

项目演示

设计板级S频段的收发机系统

要求:

发射机输入频率为512KHz, 输出频率为 2420 ± 10 MHz, 详细指标要求如下:

基带输入频率	512KHz
输入功率范围	-2dBm-2dBm
系统增益	>45dB
射频输出频率	2420 ± 10 MHz
输出功率	50W
杂散抑制	>45 dBc
谐波抑制	>40 dBc

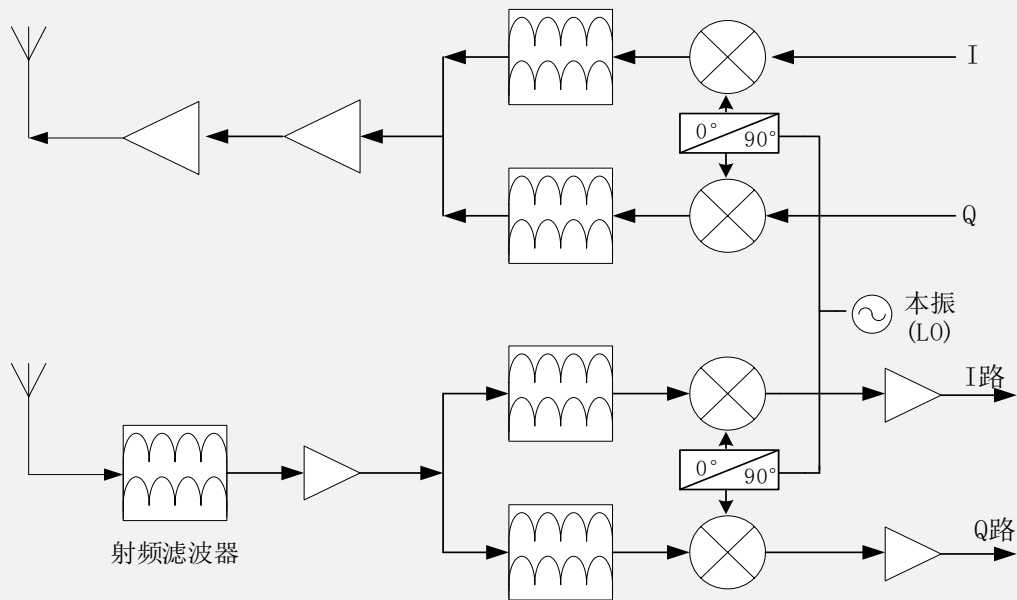
接收机指标, 输入频率为 2420 ± 10 MHz, 输出频率为512KHz

输入频率	2420 ± 10 MHz
输入功率范围	-80dBm~-60dBm
系统增益	>60dB
射频输出频率	512KHz
输出功率	-10~0dBm
杂散抑制	>45 dBc
谐波抑制	>40 dBc
噪声系数	<5dB

S波段IQ调制发射机设计技术

整机架构

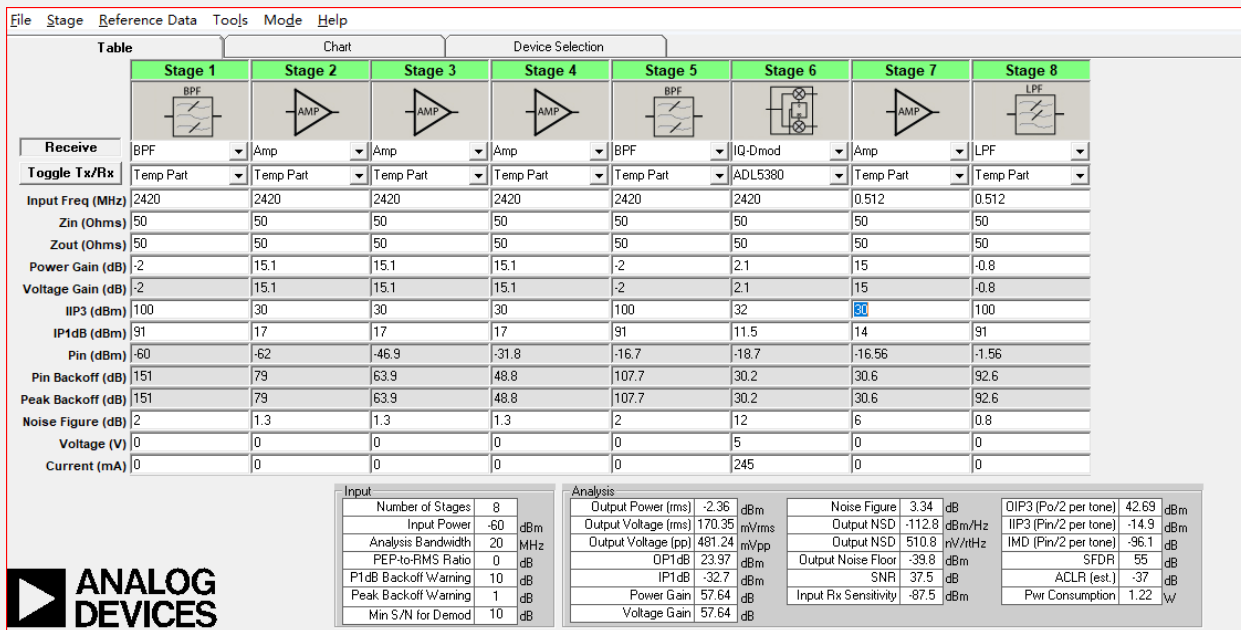
整机系统架构与方案设计



S波段IQ调制发射机设计技术

整机架构

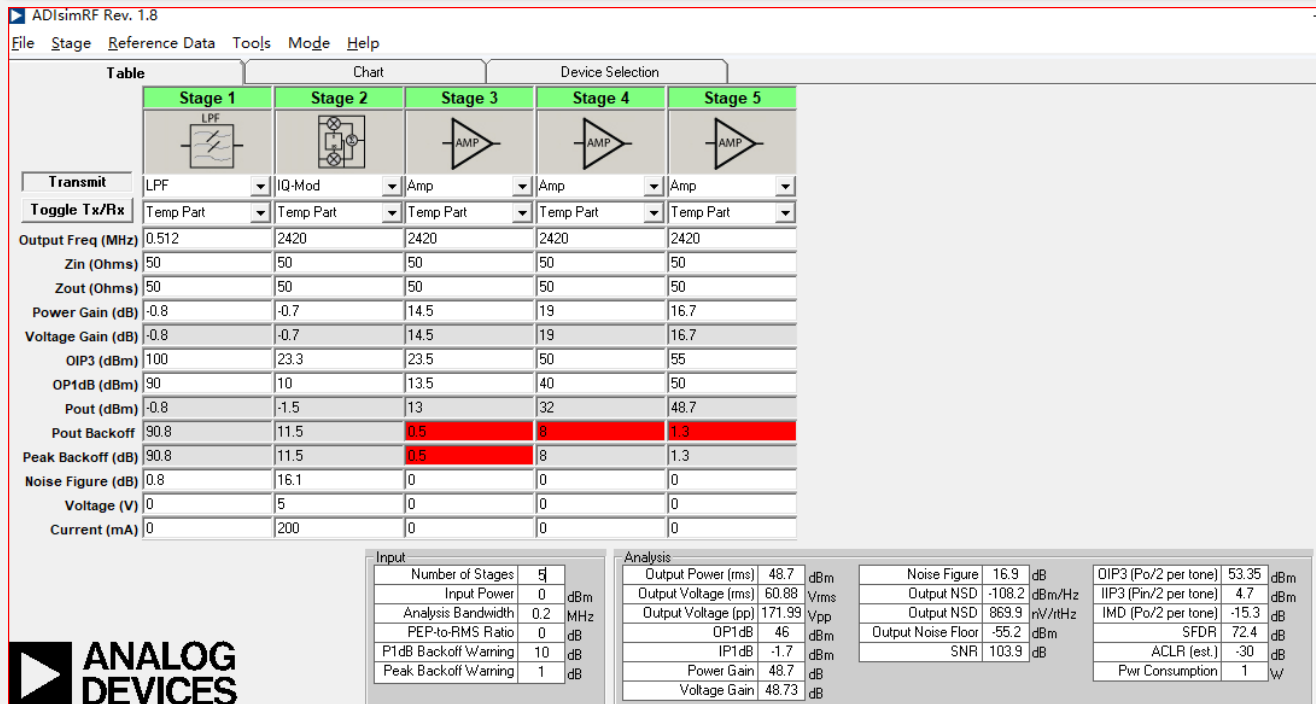
接收链路分析



S波段IQ调制发射机设计技术

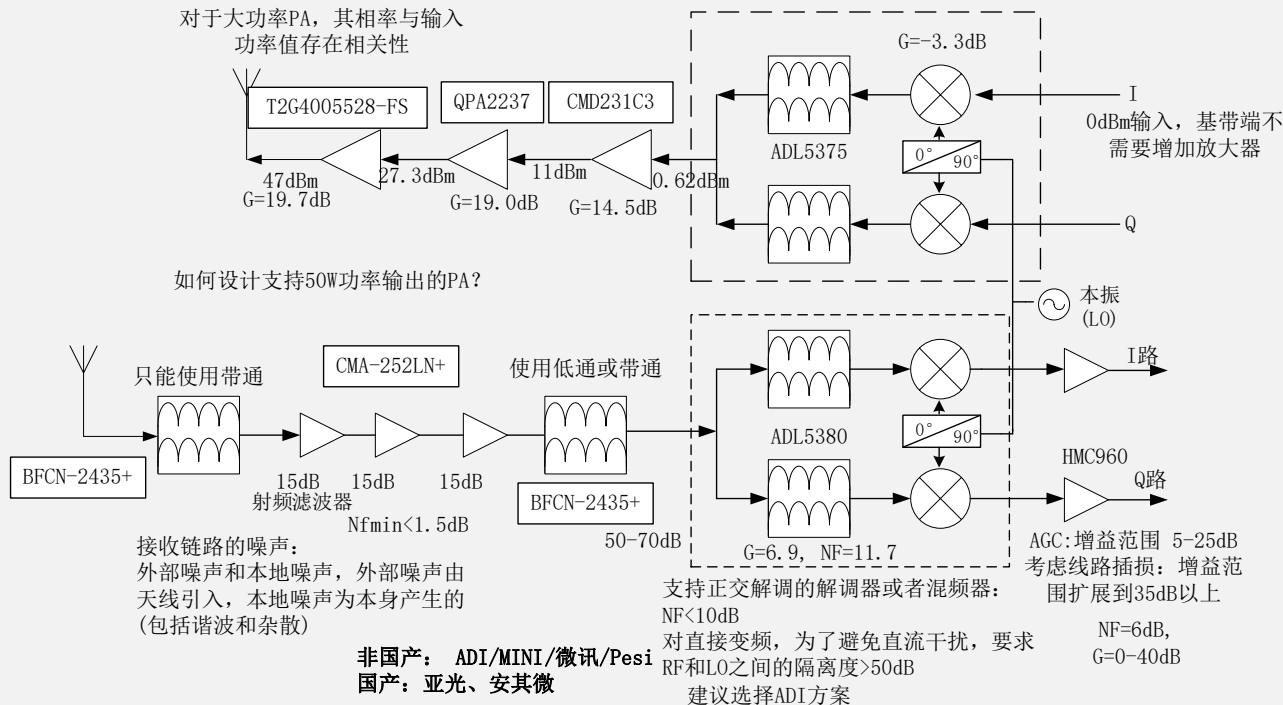
整机架构

发射链路分析



整机架构

支持正交调制的调制器



S波段IQ调制发射机设计技术

整机架构

大功率分立晶体管：

CREE;

时代速信；

威讯半导体；

NXP；



THANK YOU !!