

CMOS射频集成电路设计

2009年2月18日

唐长文 副教授

zwtang@fudan.edu.cn

<http://rfic.fudan.edu.cn/Courses.htm>

复旦大学 专用集成电路与系统国家重点实验室

版权© 2005-2009, 版权所有, 侵犯必究

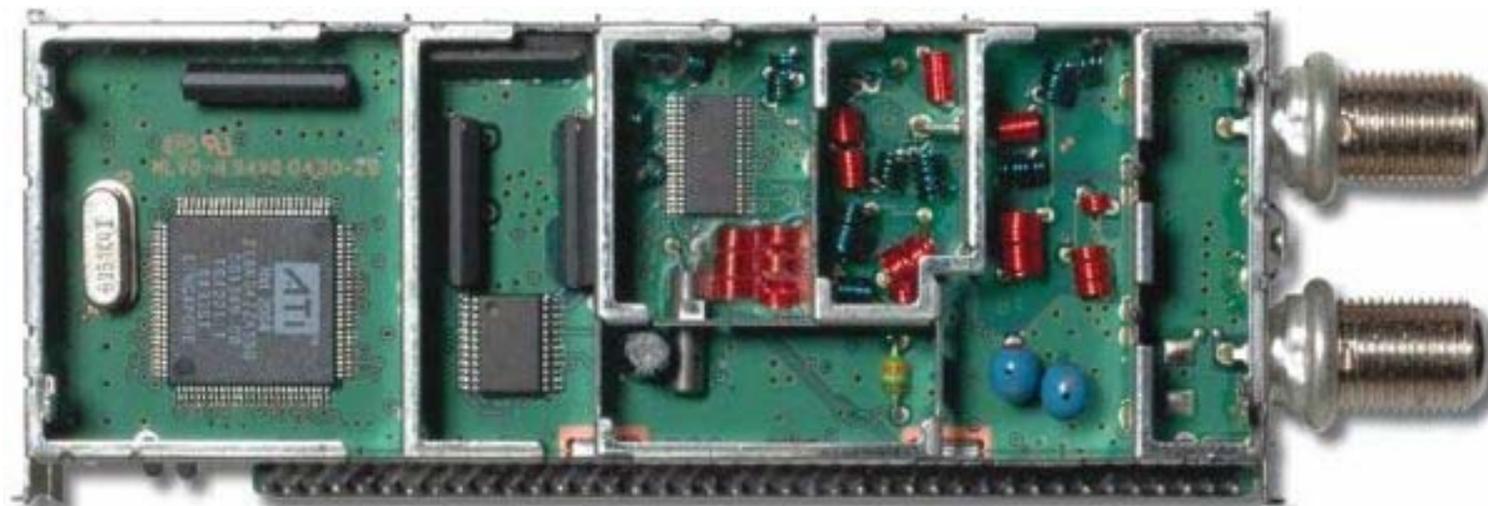
绪论

- 概述
- 古往今来: **FM**收发机与**TD-SCDMA**收发机机
- 模拟, 微波与射频集成电路
- 射频集成电路设计
- 课程内容和安排
- 参考文献和相关信息

概述(I)

- 分立射频电路

- GaAs, Bipolar 工艺制作的单个放大管
- 电感为铜丝缠绕线圈, 需要人工手动微调



铁罐电视调谐器(Can Tuner)

概述(II)

- 有源器件集成 + 片外无源器件
 - 有源晶体管采用单管集成电路
 - 无源电感仍然为**PCB**板上铜线或铜丝缠绕线圈



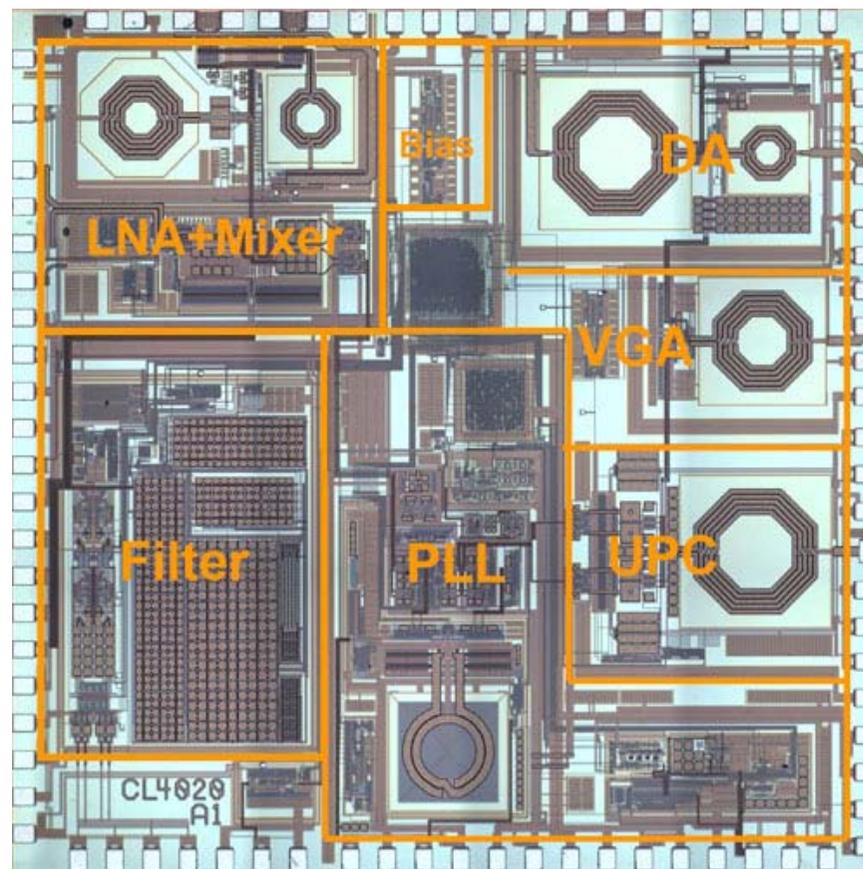
GSM 移动电话

概述(III)

- 全集成射频集成电路

- 有源/无源器件全部集成在单个硅芯片上
- 电感采用金属互连线
- 射频、数模混合**SoC**系统

TD-SCDMA 收发器芯片



概述(IV)

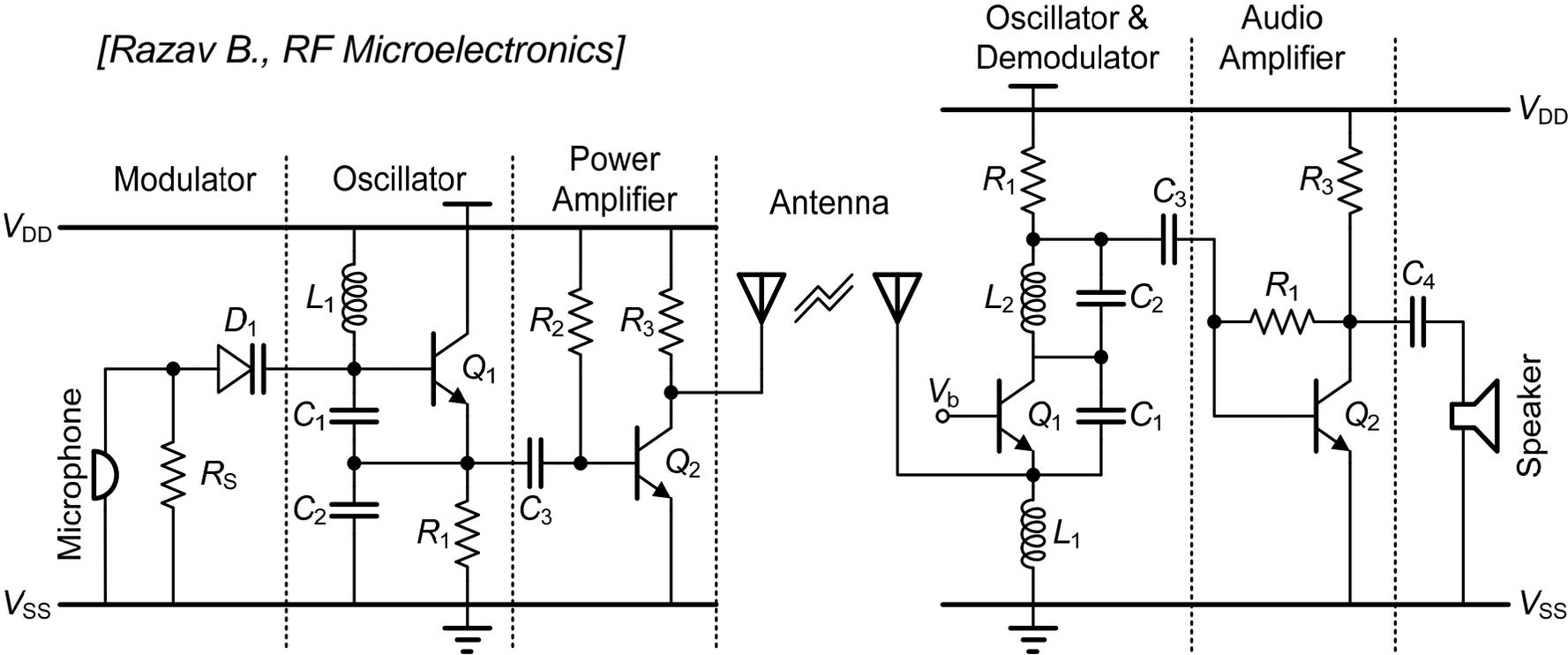
● 射频应用 - 无线射频收发器

- ❑ WLAN: IEEE 802.11 a/b/g. Enable wireless Local Area Network. 2.4G, 5.2G/5.7G and etc...
- ❑ TV Tuner: DVB-C, DVB-T, **DTMB**, 50-860MHz, DVB-S, **ABS-S**, 925-2175MHz, Mobile TV (T-DMB, DVB-H, ISDB-T, MediaFLO, **CMMB**)
- ❑ RF IDs: a small and lost-cost tags. Allows to identify who/where you are. 13.56MHz, 900MHz and 2.4GHz
- ❑ Global Position System: GPS, Glonass, Galileo, **北斗2号**, Operating around 1.5GHz to know where you are at any places
- ❑ Cellular phone: AMPs, GSM, GPRS, EDGE, CDMA, WCDMA200, WCDMA, **TD-SCDMA**
- ❑ PAN(Personal Area Network): Bluetooth, Zigbee, WSN, WiMax, UWB

无线射频收发器系统(I)

● 调频收音机系统: FM Radio

[Razav B., RF Microelectronics]

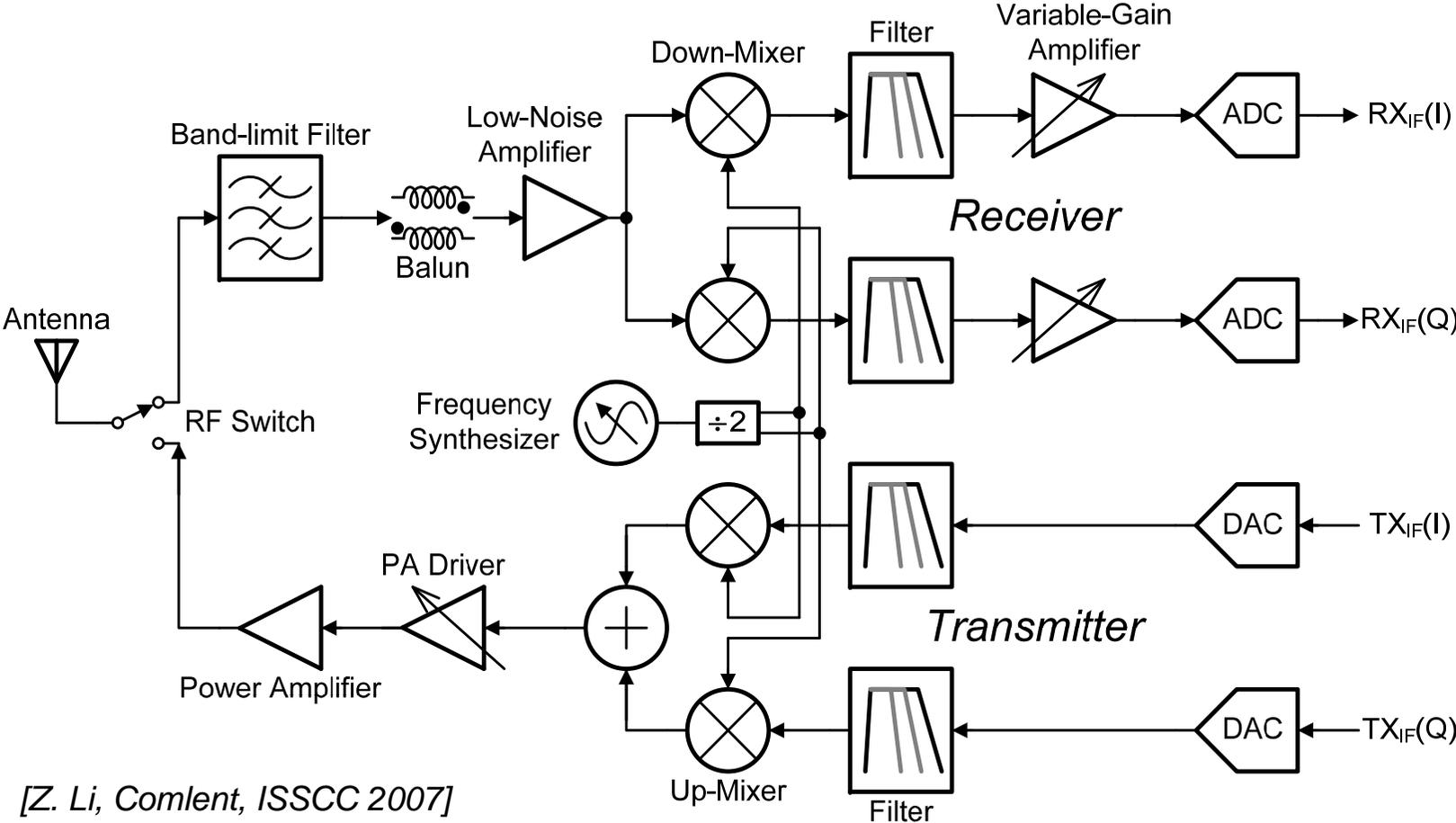


(a) 调频发射机 (FM transmitter)

(b) 调频接收机 (FM Receiver)

无线射频收发机系统(II)

● 蜂窝电话射频模拟前端系统: TD-SCDMA



[Z. Li, Comlent, ISSCC 2007]

何为射频?

● 什么频段才是射频呢?

通常意义上的射频频段

频率范围	波长范围	缩写	名称
3-30kHz	100-10km	VLF	甚低频
30-300kHz	10-1km	LF	低频
300kHz-3MHz	1k-100m	MF	中频
3-30MHz	100-10m	HF	高频
30-300MHz	10-1m	VHF	甚高频
0.3-3GHz	10-1dm	UHF	超高频
3-30GHz	10-1cm	SHF	特高频
30-300GHz	10-1mm	EHF	极高频

频段名称	频率范围 (GHz)	频段名称	频率范围 (GHz)
L	1-2	S	2-4
C	4-8	X	8-12
Ku	12-18	K	18-26.5
Ka	26.5-40	Q	33-50
U	40-60	V	50-75
E	60-90	W	75-110
F	90-140	D	110-170
G	140-220		

为什么选择高频频段?

● 频率资源

有限的

需要合理规划

● 信号带宽

信息量

中波广播	530-1700kHz
短波广播	5.9-26.1MHz
RFID	13.56MHz, 900MHz, 2.4GHz
调频广播	88-108MHz
电视广播	54-88, 174-220, 300-860MHz
遥控模型	72MHz
个人移动通信	900MHz, 1.8, 1.9, 2GHz
WLAN, Bluetooth (ISM Band)	2.4-2.5GHz, 5-6GHz
UWB	3.1-10.0GHz

模拟电路与射频/微波电路的区别

参数	模拟电路设计 (大部分在片上)	射频/微波设计 (芯片的管芯和接口)
阻抗	$Z_{in} \rightarrow \infty$ $Z_{out} \rightarrow 0$	$Z_{in} \rightarrow 50\Omega$ $Z_{out} \rightarrow 50\Omega$
信号	电压和电流 peak, p-p, rms	功率和增益 dBm, dB, dBc
噪声	nV/\sqrt{Hz}	噪声系数 NF
非线性	谐波失真THD, 交调IM2&IM3, 限幅	三阶交调点 IP3 1-dB 压缩点

单位(V, A, dBm)

- 模拟电路: 电压(伏, **V**)和电流(安培, **A**)

- 幅度 V_A , 峰值 V_p , 峰峰值 V_{pp} , 均方根值 V_{rms}

- 射频/微波电路: 功率(分贝毫瓦, **dBm**)

- 功率值 P_{watt} 和 P_{dBm}

$$V_{rms} = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}} = \frac{V_A}{\sqrt{2}} = \frac{V_P}{\sqrt{2}}$$

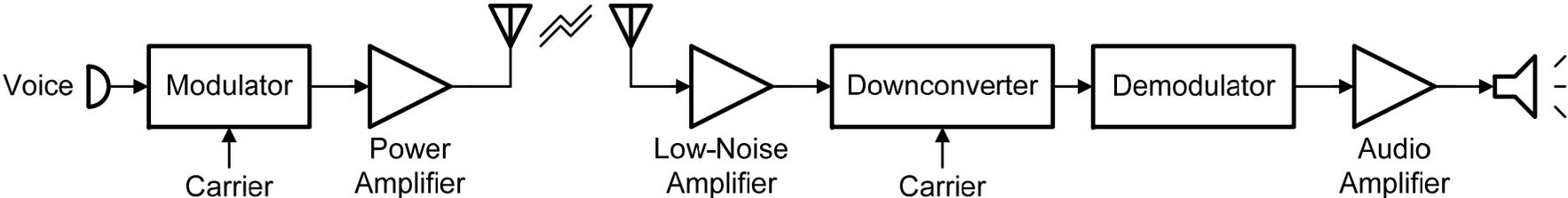
$$P_{watt} = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{watt}}{1mW} \right)$$

V_{pp}	V_{rms}	$P_{watt}(50\Omega)$	$P_{dBm}(50\Omega)$
1nV	0.3536nV	$2.5 \times 10^{-21}W$	-176
1 μV	0.3536 μV	$2.5 \times 10^{-15}W$	-116
1mV	353.6 μV	2.5nW	-56
10mV	3.536mV	250nW	-36
100mV	35.35mV	25 μW	-16
632.4mV	223.6mV	1mW	0
1V	353.6mV	2.5mW	+4
10V	3.536V	250mW	+24

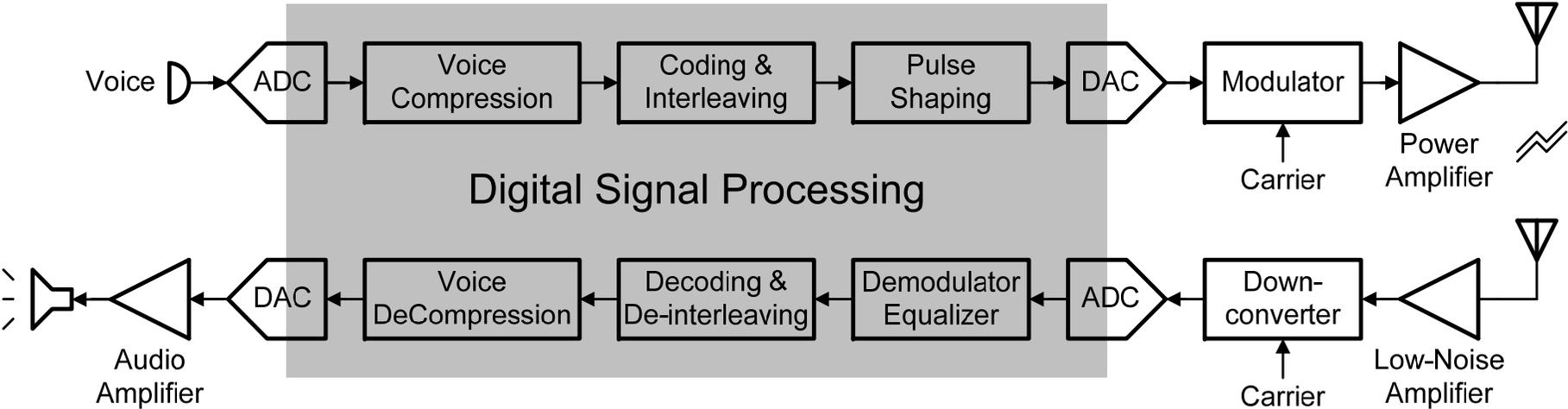
模拟和数字射频收发机系统

● 模拟射频系统



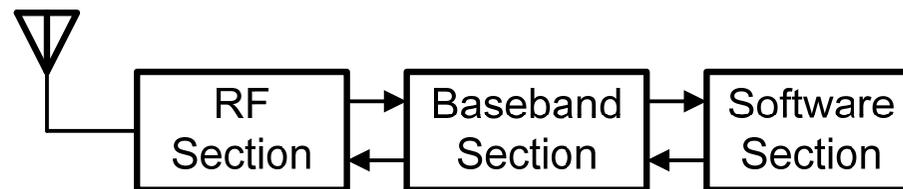
● 数字射频系统

[Razav B., RF Microelectronics]



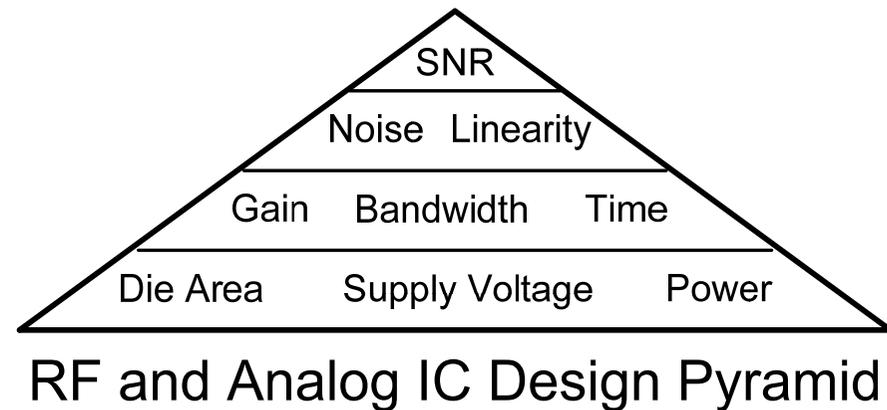
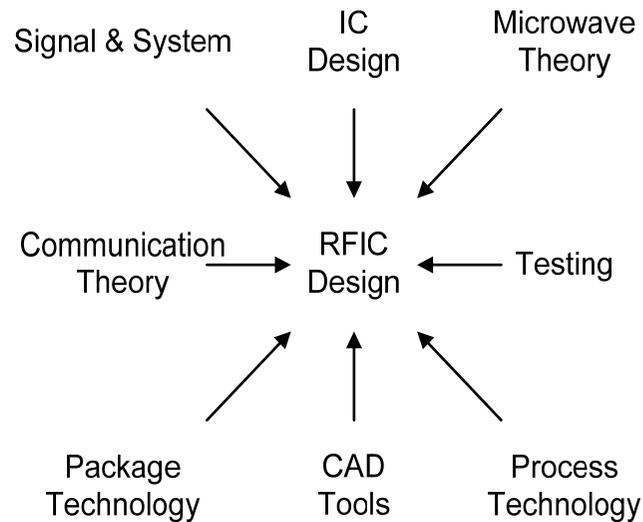
无线射频收发机系统框图

- 收发机系统包括软件、数字基带和射频模拟前端三部分
 - 软件开发平台，**ARM**，**TI-DSP**等，软件编程
 - 目前，数字基带是很清楚的
 - 射频模拟前端具有挑战性，很难！



射频集成电路设计

- 射频集成电路设计是一个多学科交叉领域



- 射频模拟集成电路设计的金字塔

□ 信噪比 **SNR**

□ 噪声 (**Noise**) 决定所能检测的最小信号

□ 线性度 (**Linearity**) 决定所能检测的最大信号

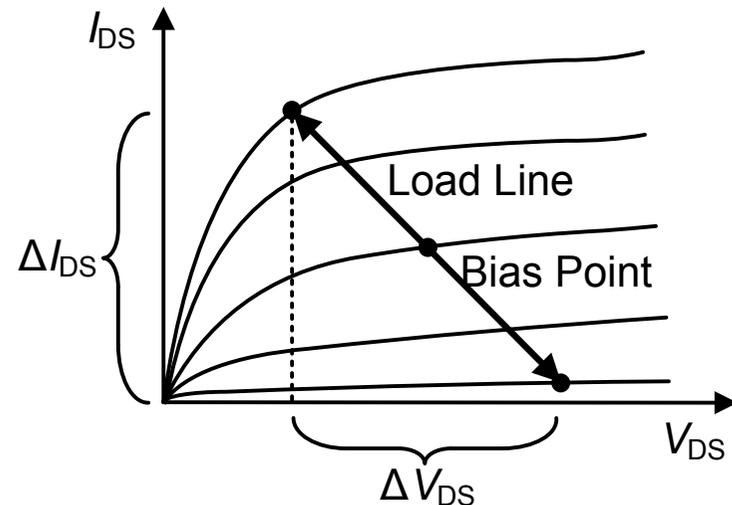
CAD工具

● 仿真方法

- 基于时间域的**SPICE**软件无法胜任,
- 基于频率/时间域的谐波平衡(**Harmonic Balance**)仿真和包络(**Envelope**)仿真
- 小信号分析与大信号分析

● 商用**EDA**软件

- **EM Simulator, HFSS, Momentum**
- **AWR Microwave Office**
- **Agilent IC-CAP, ADS & RFDE,**
- **Cadence SpectreRF,**
- **Mentor EldoRF,**
- **Synopsys HspiceRF**



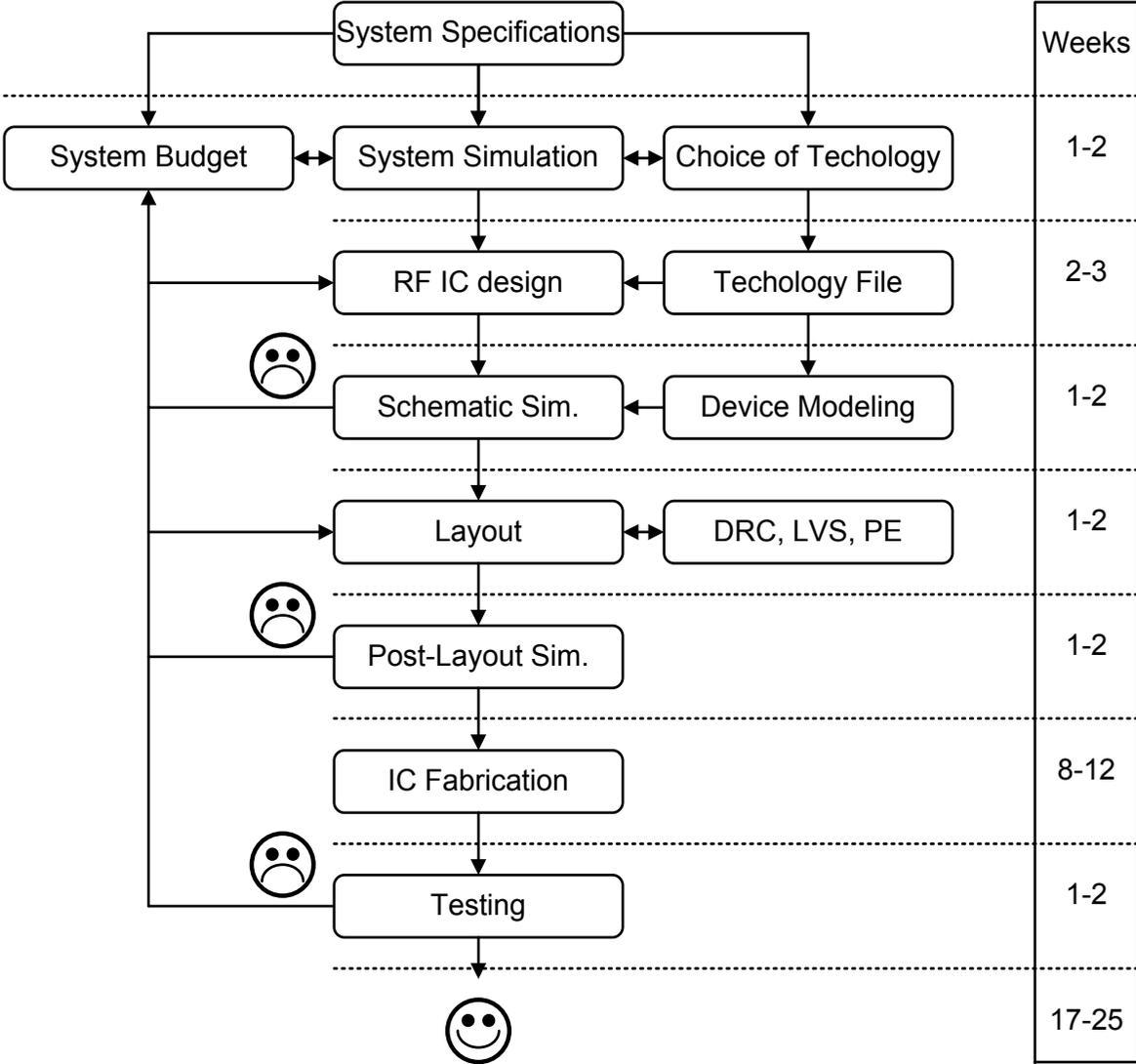
Small signal

- Input power and ΔV_{DS} , ΔI_{DS} very small
- Signal swing stays in bias point
- Linear approximations

Large signal

- Input power and ΔV_{DS} , ΔI_{DS} large
- Signal swing up to boundaries

射频集成电路设计流程



射频集成电路工艺选择

- **GaAs/InP**

高击穿电压, 高截止频率, 半绝缘衬底, 高品质电感和电容
应用: 功率放大器 **Power amplifier**

- **Silicon BJT**

同样非常普遍
应用: 低噪声放大器 **Low-noise Amplifier**

- **BiCMOS (SiGe)**

有利于RFIC电路的高度集成, 但价格很贵
应用: **GSM**射频前端电路

- **CMOS**

便宜、高集成度, 但存在许多设计问题待解决
应用: **GPS, Bluetooth, Wireless LAN, Mobile TV Tuner**

为什么要CMOS RFIC?

- 推动**CMOS RFIC**发展的主要原因
 - 个人通信系统的需求
 - **CMOS**工艺的高度集成
- **CMOS**工艺实现**RFIC**有什么好处?
 - 就性能而言, **CMOS**工艺不适合**RFIC**
 - ❖ 截止频率低于**GaAs, Bipolar**等工艺
 - ❖ 半导体衬底, 噪声性能差
 - 就应用前景而言, **CMOS RFIC**有巨大的商业潜力
 - ❖ 与数字/模拟电路集成, 真正实现射频系统单片集成
 - ❖ 极大地降低制造成本

课程内容和安排

● 主要内容

□ 17次课程,

一次一个专题

□ 2次考试

□ 1次项目报告

章节	日期	教学内容	课时	作业
第一章 基本概念	2/18	1. 课程概述	0.5	
	2/25	2. 噪声、非线性和滤波	2.0	第一次
第二章 无源/有源器件	3/4	1. 阻抗匹配 (更新)	0.5	
	3/11	2. 片上螺旋电感	1.0	
	3/18	3. 可变电容, 电容, 电阻和有源器件	1.0	第二次
第三章 低噪声放大器	3/25	1. 窄带低噪声放大器	1.0	
	4/1	2. 低噪声放大器的设计优化技术	1.0	第三次
第四章 混频器	4/8	1. 混频器: 有源和无源 (更新)	1.0	
	4/15	2. 混频器性能分析(IIP3, NF) (更新)	1.0	第四次
期中考试	4/22		1.0	
第五章 压控振荡器	4/29	1. 压控振荡器基本电路结构	1.0	
	5/6	2. 相位噪声分析	1.0	第五次
	5/13	3. 电感电容压控振荡器	1.0	
第六章 频率综合器	5/20	1. 频率综合器: 基本原理和电路结构	1.0	第六次
	5/27	2. 环路参数和相位噪声分析	1.0	
第七章 功率放大器	6/3	1. 功率放大器原理	1.0	第七次
第八章 无线收发机构架	6/10	1. 调制解调、接入技术和标准协议	1.0	
	6/17	2. 无线收发机构架	1.0	第八次
期终考试	7/3		1.0	
项目报告	8/7	0.1-to-6GHz SDR Transceiver		

● 先修课程

- 模拟电子线路、高频电子线路基础
- 模拟电路设计精华(**Analog Design Essentials**)
- 模拟集成电路和系统设计(**ELEC6025**)
- 半导体工艺流程和器件原理

● 评分标准

- 平时成绩: **20%**, 八次作业和考勤
- 期中考试: **20%**
- 期末考试: **30%**
- 课程项目: **30%**, 每人一个项目, 独立完成

前五名课程项目提供CMOS SMIC 90/65nm MPW流片

参考文献和相关信息

- 参考书

- Razavi, Behzad. ***RF Microelectronics***

- John Rogers, Calvin Plett, ***Radio Frequency Integrated Circuit Design***

- Frank Ellinger, ***Radio Frequency Integrated Circuits and Technologies***

- 参考杂志和会议

- IEEE JSSC, ***Journal of Solid-State Circuits***

- IEEE MTT, ***Transactions on Microwave Theory and Techniques***

- ISSCC: ***International Solid-State Circuits Conference***

- Symposium on ***Radio Frequency Integrated Circuits***

- 授课教师

唐长文, 副教授, 复旦大学微电子学系

Email: zwtang@fudan.edu.cn

Website: <http://rfic.fudan.edu.cn/Courses.htm>

电话: 021-51355200转842

- 助教

卢磊, 韩科锋, 赵薇, 微电子楼**365**室, **51355329/5330**

- 答疑

□ 张江校区微电子楼**373/365**室

□ www.eetop.cn/bbs论坛的“Analog/RFIC设计”版块