

射频集成电路设计基础

东南大学射频与光电集成电路研究所
射频集成电路与系统教育部工程研究中心

李智群

Email: zhiquanli@seu.edu.cn

Tel: 83793303-8116

第一章 概述

- 无线通信技术的发展
- 频谱划分
- 通信系统组成
- 无线通信系统举例
- 无线通信与 **RFIC**设计
- 课程内容

无线通信技术的发展

- 无线通信系统和技术飞速发展
- 无线通信发展的理论技术基础
 - James Maxwell 在1864年伦敦英国皇家学会发表的论文中首次提出了电场和磁场通过其所在的空间中交连耦合会导致波传播的设想。
 - 1887年Heinrich Hertz 实验证实了电磁能量可以通过空间发射和接收。
 - 1901年Guglielmo Marconi 成功地实现了无线电信号 (Radio Signals) 横越大西洋。
 - 从此无线技术正式诞生。从1920年的无线电通信，1930年的TV传输，到1980年的移动电话和1990年的全球定位系统 (GPS) 及当今的移动通信和无线局域网 (WLAN)。
 - 射频集成电路 (RFIC) 的发展推动了无线通信技术的发展，是当代无线通信的基础。
- RFIC已在世界范围内成为大学、研究院所和通信相关产业研究开发的热点

频谱划分

- 当今最通用的频谱分段法是由电气和电子工程师学会(IEEE)建立的

我们关心的频段

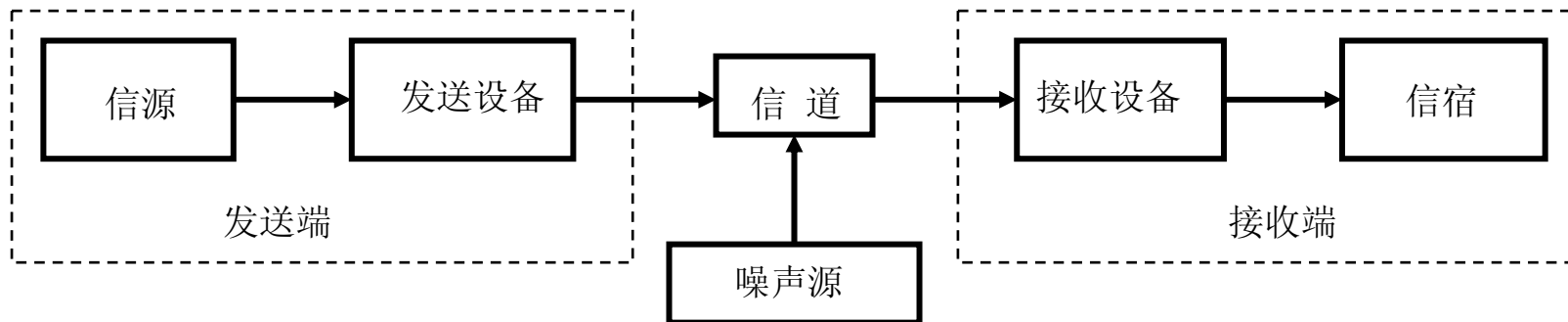
30-300kHz	LF
300kHz-3MHz	MF
3-30MHz	HF
30-300MHz	VHF
300-1000MHz	UHF
1-2 GHz	L-Band
2-4 GHz	S-Band
4-8 GHz	C-Band

中波广播	530-1700 kHz
短波广播	5.9-26.1 MHz
RFID	13 MHz
调频广播	88-108 MHz
(无线)电视	54-88, 174-220 MHz
遥控模型	72 MHz
个人移动通信	900MHz, 1.8, 1.9, 2 GHz
WLAN, Bluetooth (ISM Band)	2.4-2.5GHz, 5-6GHz

注1: 本表主要参考国外标准

注2: ISM = Industrial, Scientific and Medical

通信系统的组成



- 信源：输出基带信号 (baseband)
- 发送设备：将基带信号进行调制，变换为适合信道传输的频率，并送入信道。调制后的信号称为已调信号或通带信号 (passband)。
- 接收设备：将已调信号进行解调，还原成基带信号
- 信宿：将解调后的基带信号变换为相应的信息
- ✓ 模拟通信系统：传输模拟信号
- ✓ 数字通信系统：传输数字信号

通信系统的组成

• 调制的原因

无线通信中把基带信号变成射频已调信号有两个原因：

- 为了有效地把信号用电磁波辐射出去
 - 基带信号是低频信号，如话音信号频率为300-3400Hz，波长达1000km，天线长度取1/10波长，对应的天线长度达100km以上，不可能实现。
 - 为了有效地辐射，发射信号的频率必须是高频，以降低天线的尺寸。发射机中振荡器产生的高频信号称为载波。
- 为了有效地利用频带来传输多路频率范围基本相同的基带信号，可将多路基带信号分别调制到不同频率的载波上，以避免基带信号之间的相互干扰。

• 调制方式

- 用基带信号控制载波的幅度、频率和相位分别对应调幅、调频和调相。
- 模拟调制：用模拟信号调制载波
- 数字调制：用数字信号调制载波

通信系统的组成

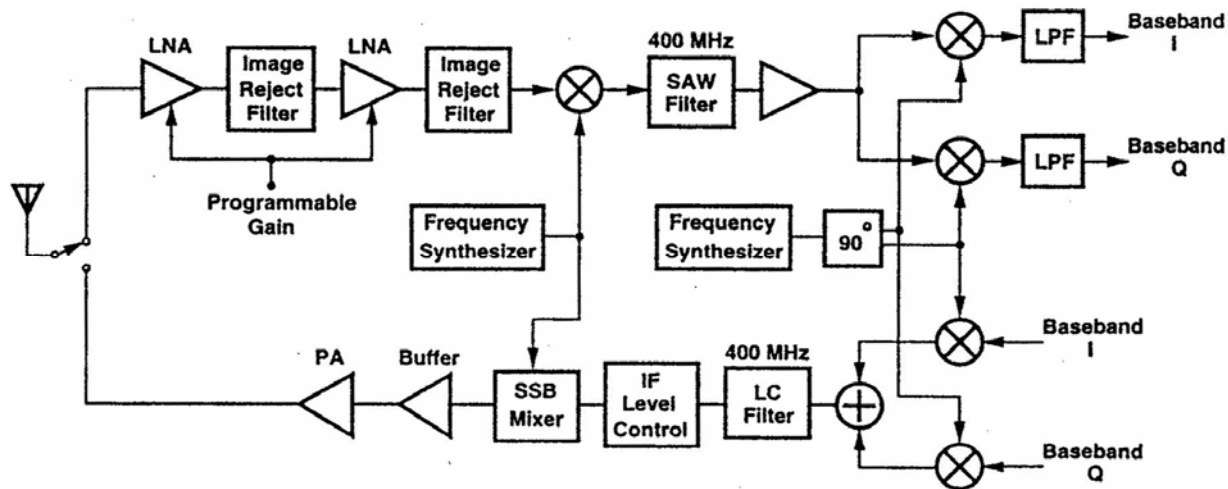
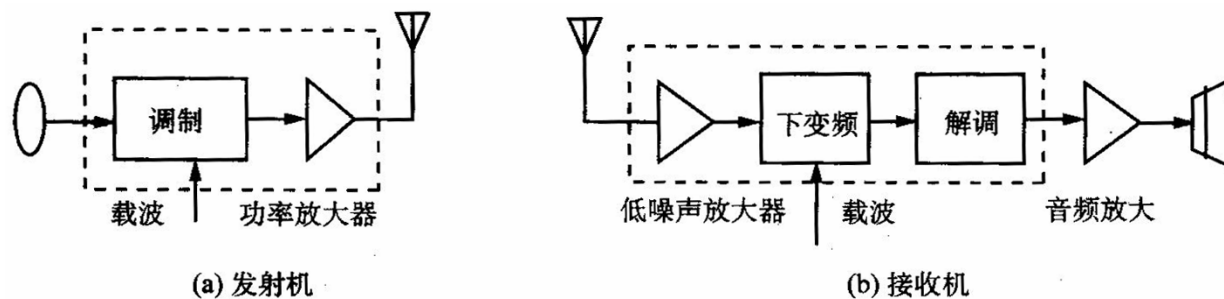
- 信道

- 信道是传输媒介，分为有线和无线两类
- 有线信道：电线、电缆、光纤、波导
- 无线信道：自由空间

- 无线信道中的干扰

- 多径衰落
- 邻近频道干扰
- 多普勒频率、频谱色散
- 无线移动信道是条件最为恶劣的一种信道
- 快速发展的无线通信技术正是为了克服无线信道的缺陷，以保证通信的可靠性

无线通信系统举例



RF section of a cellphone

无线通信系统举例 — 数字电视芯片

数字电视按传输方式分为地面、卫星和有线三种。

➤ASTC(美国)

(Advanced Television System Committee, 先进电视制式委员会)

➤ISDB-T(日本)

(Integrated Services Digital Broadcasting, 综合业务数字广播)

➤DVB(欧洲)

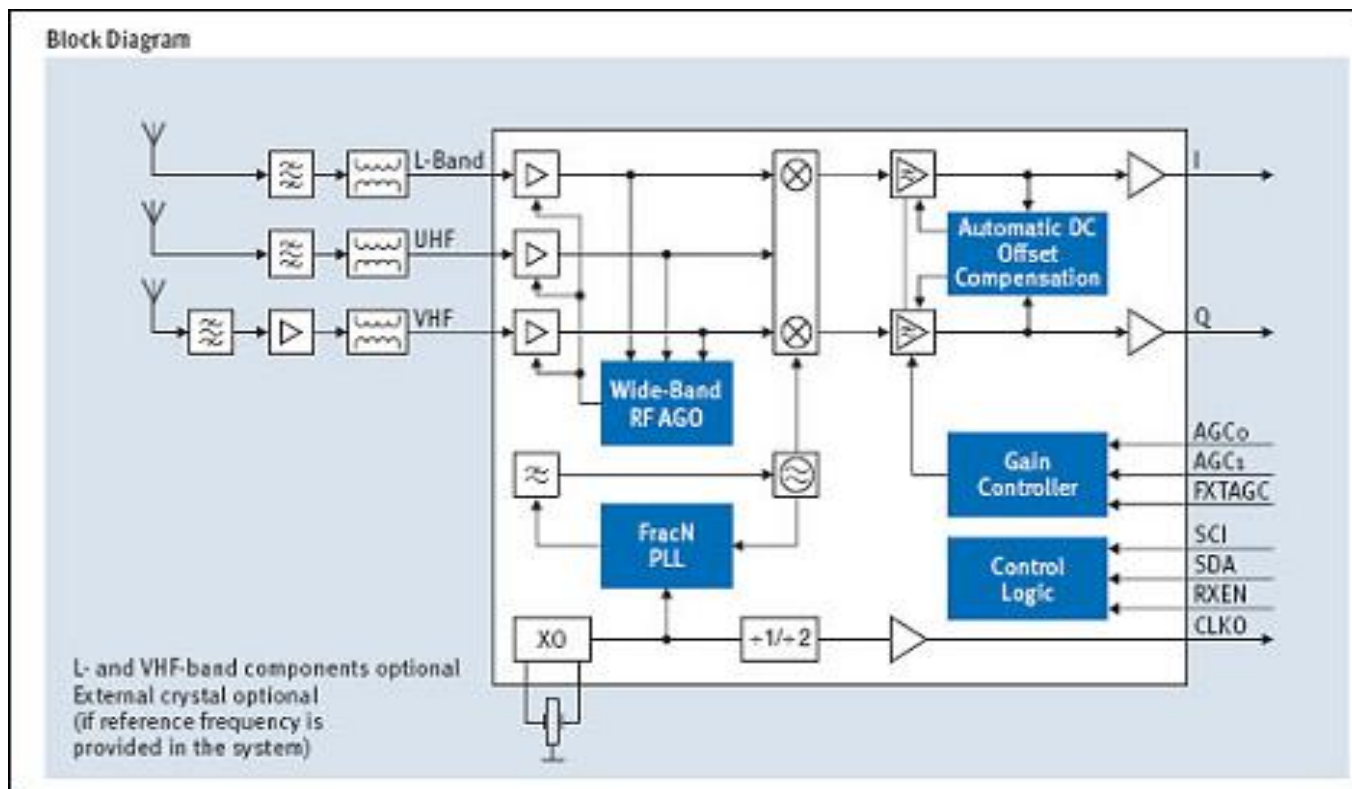
(Digital Video Broadcasting, 数字视频广播)

➤CMMB (中国)

无线通信系统举例 — 数字电视射频芯片

➤ 英飞凌（Infineon）OmniTune TUA9000

(直接转换式多频段硅调谐器芯片，0.13 μm RF CMOS工艺)



无线通信系统举例 — 移动通信射频芯片

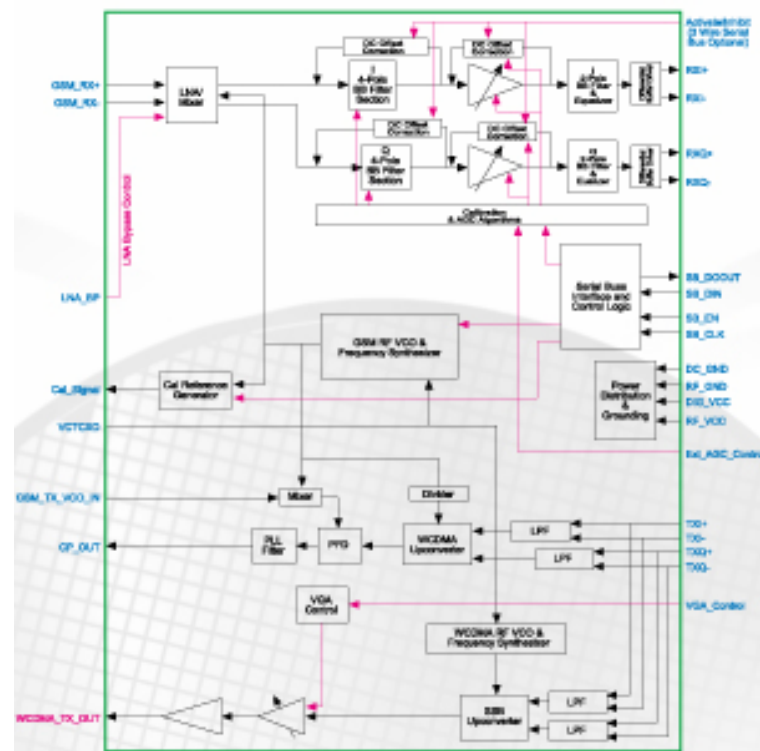
➤ 移动通信标准

标准	类型	多址方式	频带/MHz	调制方式	信道带宽
GSM	蜂窝	TDMA	890~960	GSMK	200kHz
PHS	无绳	TDMA	1900~1920	π -QPSK	300kHz
IS-95	蜂窝	FDMA	824~894	QPSK/BPSK	1.25MHz
EDGE	蜂窝	TDMA	890~960	8-PSK	200kHz
CDMA-2000	蜂窝	CDMA	1920~1980	QPSK	2×5 MHz
WCDMA	蜂窝	CDMA	2110~2170	BPSK/QPSK	5MHz
TD-SCDMA	蜂窝	CDMA	2010~2250	QPSK/8-PSK	1.6MHz

无线通信系统举例 — 移动通信射频芯片

➤ 广晟微RS1007RF/RS1007W (WCDMA/GSM双模手机)

- WCDMA发射机及GSM900/1800
- 高精密度的带自动精度校准的I/Q上变频器
- 全集成的VCO和频率综合器
- 全集成用于发射机的基带低通滤波器
- 差分设计降低串扰和谐波干扰
- 3W串行总线接口
- 低功耗设计，睡眠时间消耗40mA电流
- QFN48封装（可依客户要求封装）



无线通信系统举例 — WLAN射频芯片

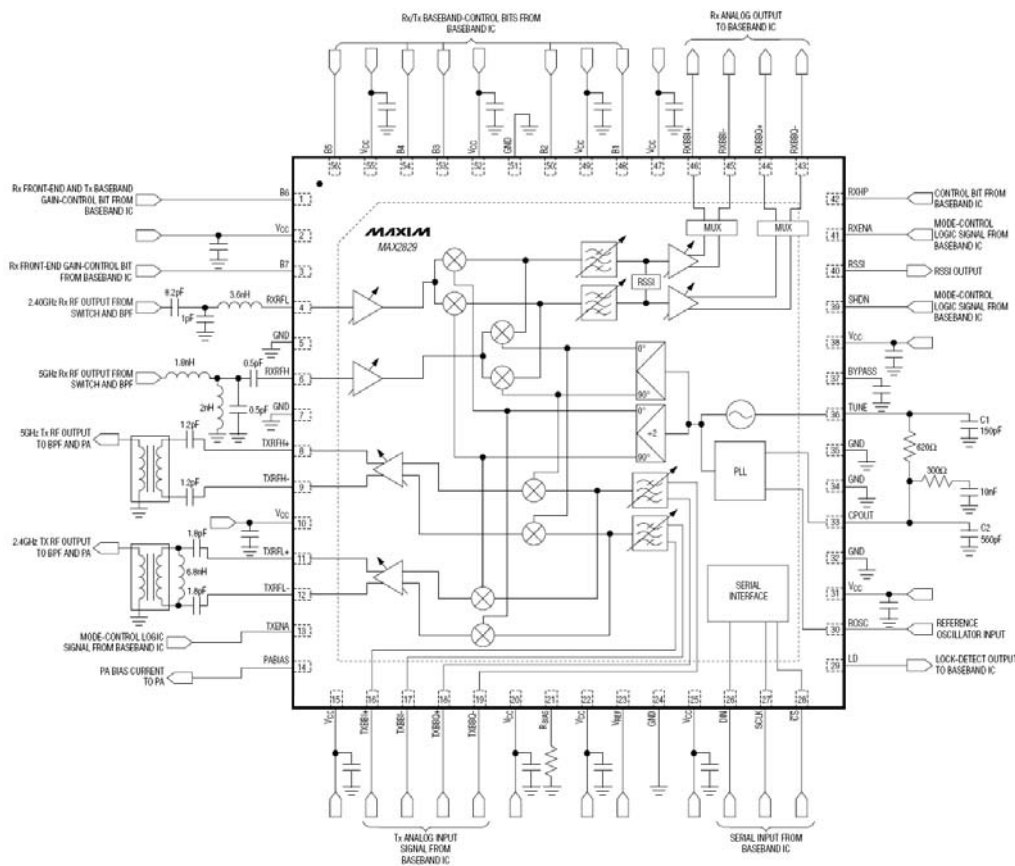
➤ MAX2829 双频802.11a/g 单片RF收发器

可覆盖2.4GHz至2.5GHz和4.9GHz至5.875GHz的全波段频率范围。

在接收器/发送器内集成了滤波器,无需外部SAW滤波器。

基带滤波器和Rx/Tx 信号通道经过优化,满足802.11a/g IEEE 标准。

灵敏度比802.11a/g 标准提高10dB。



无线通信系统举例 — GPS射频芯片

- GPS(美国)
- Galileo(欧洲)
- GLONASS(俄罗斯)
- 北斗(中国)

GPS信号接收机，是GPS导航卫星的用户设备，是实现GPS卫星导航定位的终端仪器；它是一种能够接收、跟踪、变换和测量GPS卫星导航定位信号的无线电接收设备，既具有常用无线电接收设备的共性，又具有捕获、跟踪和处理弱达-150dBm的GPS信号的特性。

无线通信系统举例 — GPS射频芯片

➤ MAXIM GPS接收机前端芯片MAX2745

完整的单片GPS无线器件，用于
16.368MHz和32.736MHz设计；

在4.092MHz提供单端或差分输出；

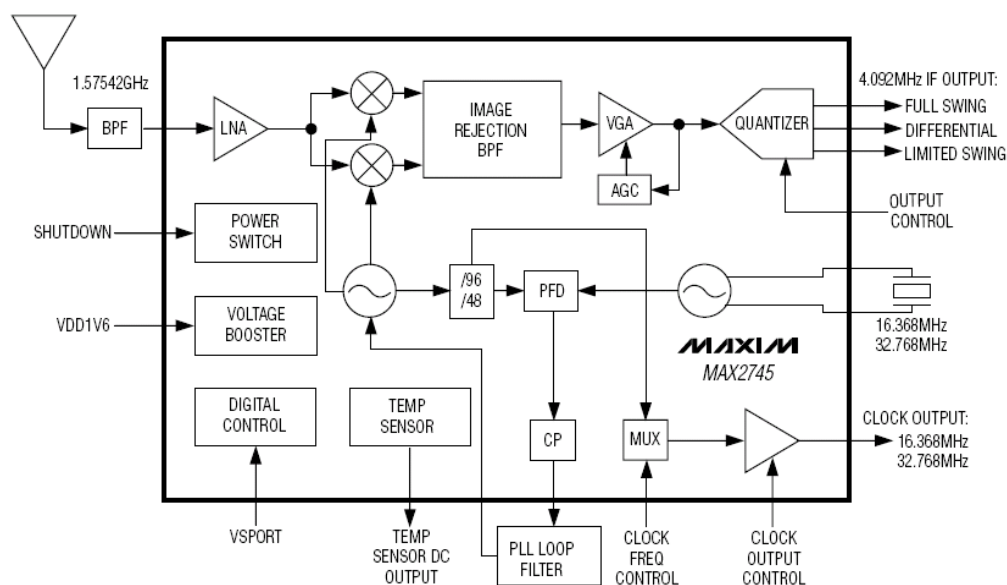
低至3.5dB的典型噪声系数；

无需外部IF SAW或分立滤波器；

片内温度传感器；

2.4V至3.6V宽电源电压范围；

在2.4V供电时的功耗仅为
41mW；

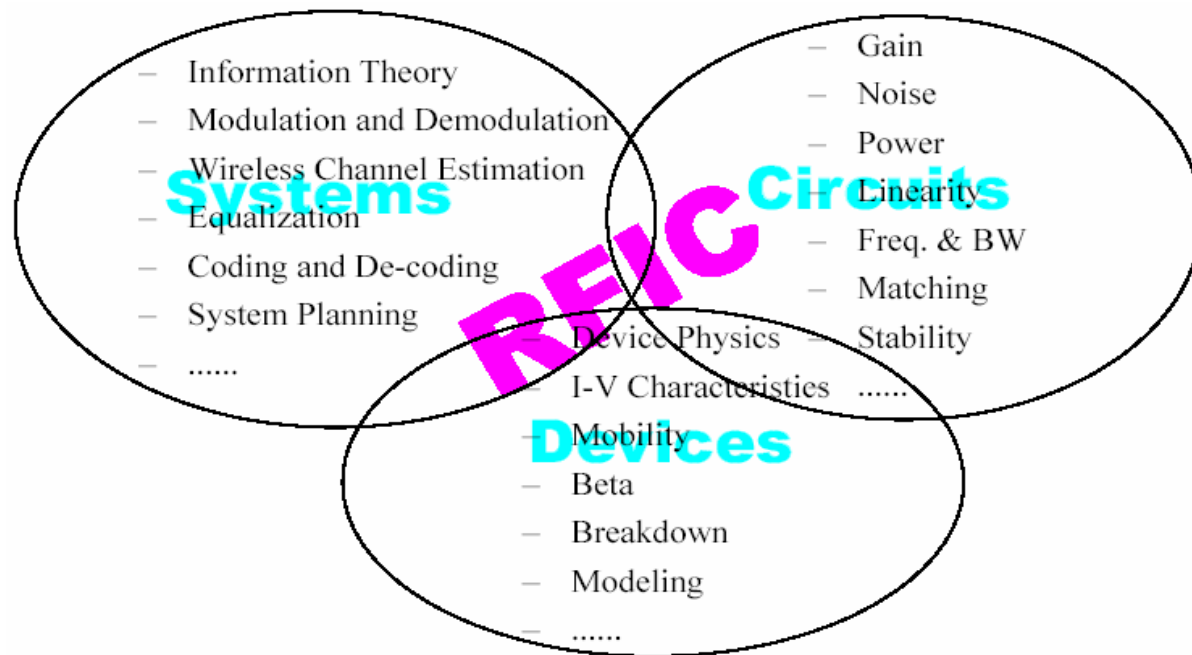


无线通信与RFIC设计

➤ RFIC设计成为无线通信系统发展的瓶颈

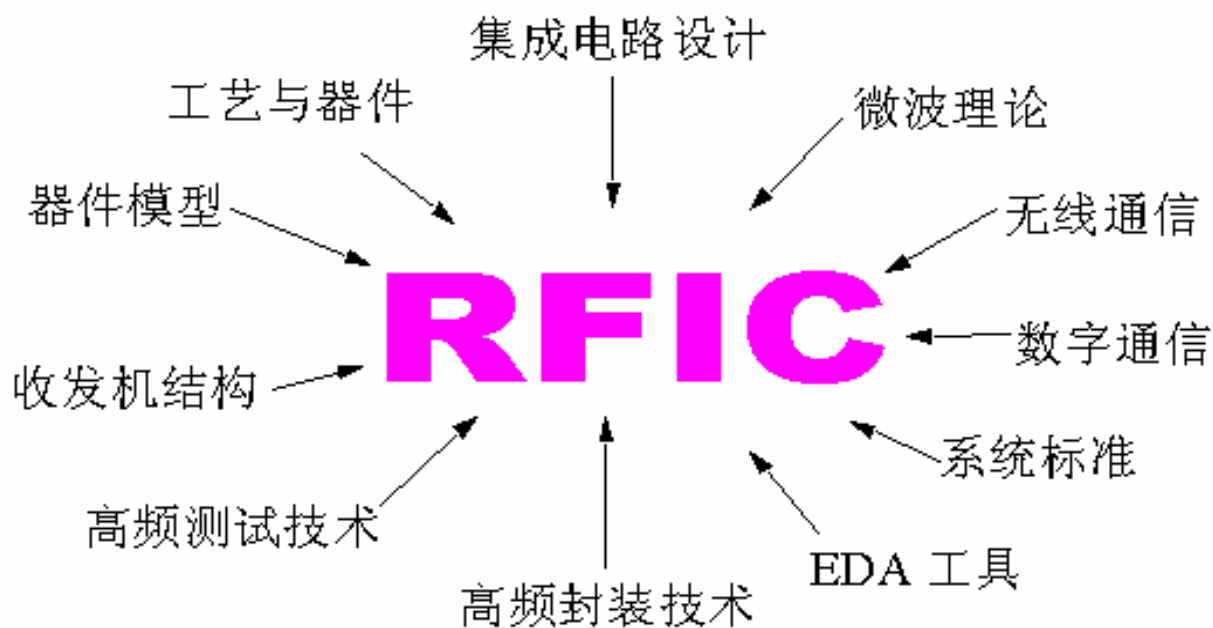
大量的专业知识、长期经验、专用**EDA**工具、昂贵的测试设备

射频设计工程师应具备的知识面



无线通信与RFIC设计

➤ RFIC所涉及的相关学科和技术



无线通信与RFIC设计

- **RFIC正处于发展阶段**

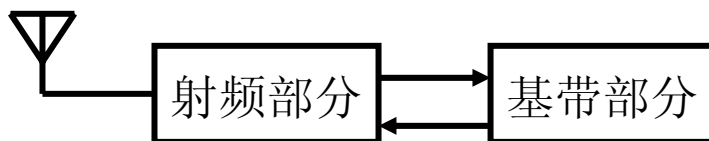
- 基带部分可以采用成熟的数字集成电路技术
 - Artisan: Memory generator, Standard Cells, I/O Cells
- 射频集成电路还处于发展阶段，电感的性能急待提高
 - Mixed-signal, RF 工艺

- **EDA工具处于发展阶段**

- 分析和综合的结果只起参考作用
 - Spice, ADS, Cadence
- 在射频器件的非线性、时变特性、电路的分布参数、不稳定性等方面缺乏精确的模型，设计是否成功在很大程度上取决于设计师的经验
 - 前仿真
 - 后仿真：版图参数提取，连线R和C提取
 - 低温、高温、Slow、Fast、Typical
 - 集成电路制造（流片）
 - 测试

无线通信与RFIC设计

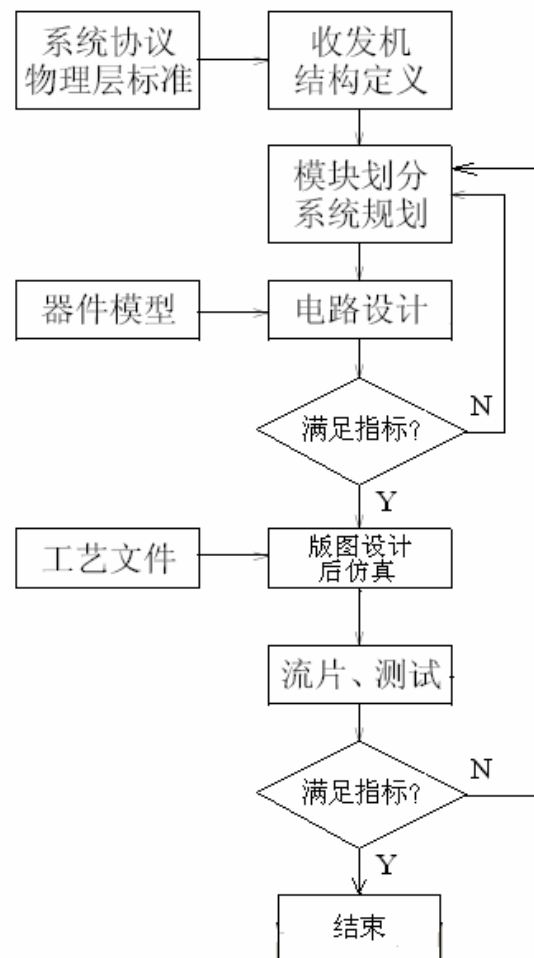
- 无线通信系统包括射频部分和基带部分



- 基带部分的功能：完成频率较低的数字信号或模拟信号的处理功能
- 射频部分的功能：处理宽动态范围的高频模拟信号
 - 调制、解调、低噪声放大、功率放大、频率变换、滤波
- 射频设计的要求
 - 良好的选择性
 - 低噪声、高动态范围
 - 接受机对杂散频率信号有良好的抑制能力
 - 本振信号应具有很低的相位噪声
 - 发射机必须严格限制带外辐射
 - 低功耗设计
 - 发射机功率放大器应具有高效率

无线通信与RFIC设计

- 研究内容
 - 射频收发机 (Transceiver) 体系结构, 频率、功耗、增益、噪声、非线性的总体要求和分配
- 解决问题
 - 电路模块对系统的影响
- 目的
 - 合理分配资源, 降低系统成本、功耗、体积, 满足系统整体性能要求



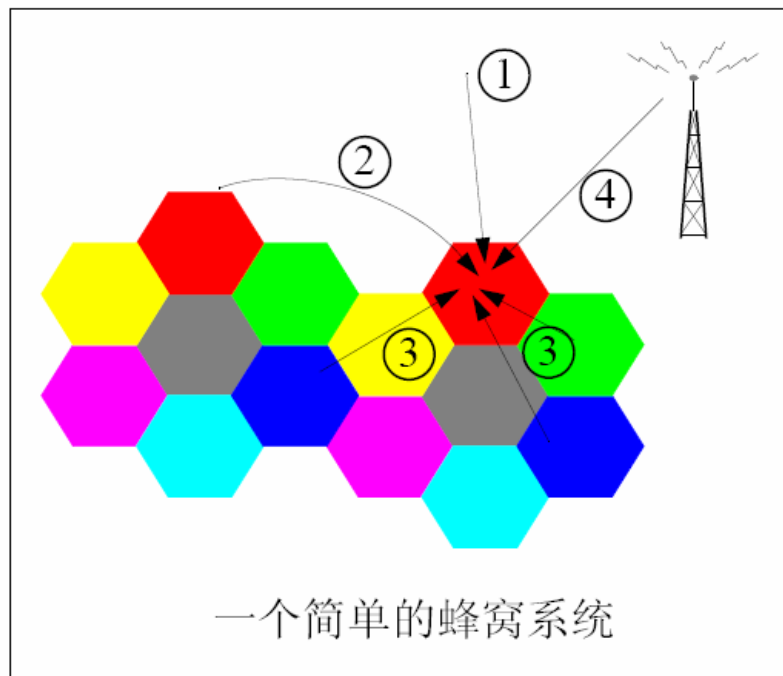
课程内容

- 无线通信系统和信道

- 噪声
 - » 内部噪声
 - » 外部噪声(1)
- 干扰(系指无线电台间的相互干扰)
 - » 同信道干扰(2)
 - » 相邻和临近信道干扰(3)
 - » 来自其它系统的干扰和阻塞(4)
- 无线信道的不理想性
 - » 信号随传播距离迅速衰减

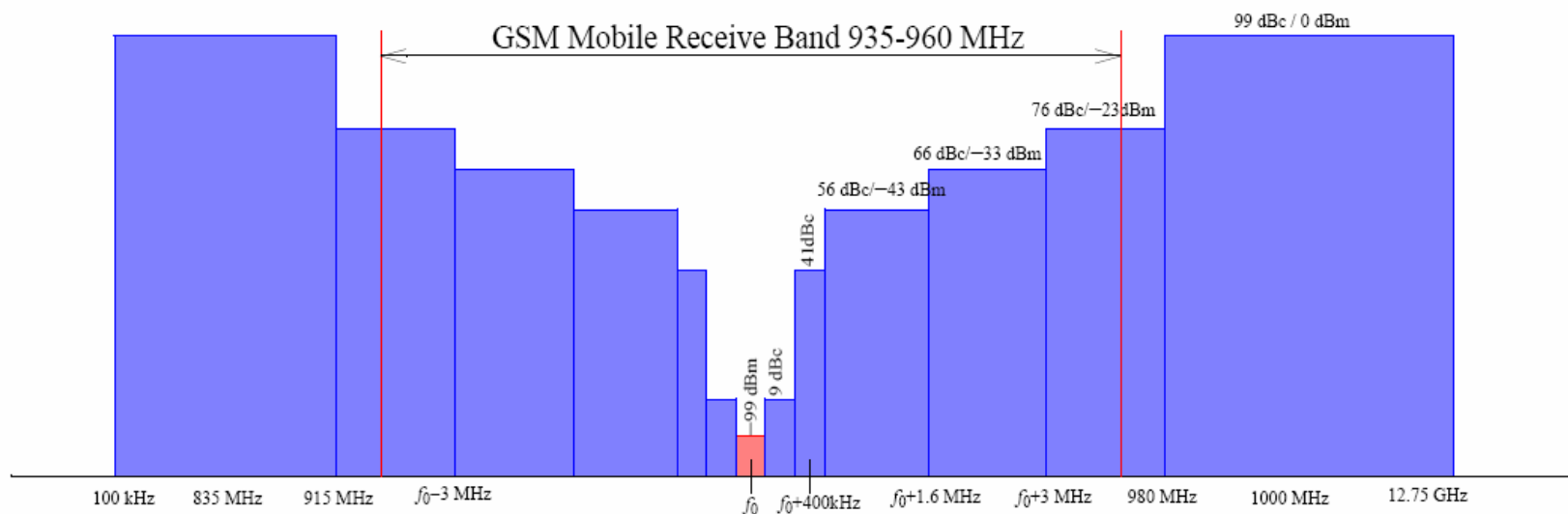
$$P_r \propto P_t / d^n$$

- » 多径衰落：不同反射路径的信号在接收天线处叠加，造成几十dB的信号起伏
- 决定了接收机灵敏度、动态范围、选择性，发射机功放的结构，信号的泄漏等指标



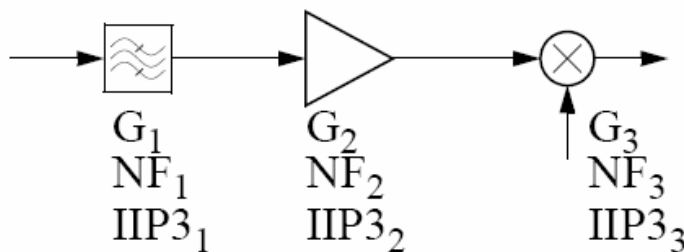
课程内容

– Example: GSM 系统的信号和干扰情况



课程内容

- 接收/发射机规划
 - 接收机体系结构 (中频的选择, 频率规划)
 - » 镜像频率及其抑制问题
 - » 超外差(几次变频)
 - » 低中频
 - » 零中频
 - 接收机模块划分, 噪声、增益、线性度、选择性、功耗等的分配或预算 (Budget)



$$G_{tot}=?$$

$$NF_{tot}=?$$

$$IIP3_{tot}=?$$

- 发射机结构
- 频率合成技术

课程内容

- 噪声、噪声系数

- 天线噪声：天线从周围环境中接收到的噪声能量，输出到接收机的噪声功率为 $P_n = kT_n B_n$

- » $k = 1.38 \times 10^{-23}$ joules/K 为玻尔兹曼常数 (Boltzmann's constant)

- » T_n 为等效的天线噪声温度，随频率而变化，但被简单地认为是 290°K

- » B_n 为接收机等效噪声带宽

- 电路中的噪声源

- » 电阻、晶体管、PN结

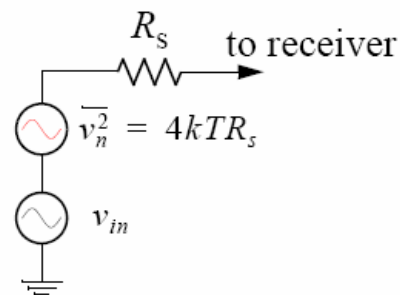
- » 理想的电感电容不产生噪声

- 噪声系数

- » 即使没有输入，电路中的噪声源也会在输出端产生噪声功率

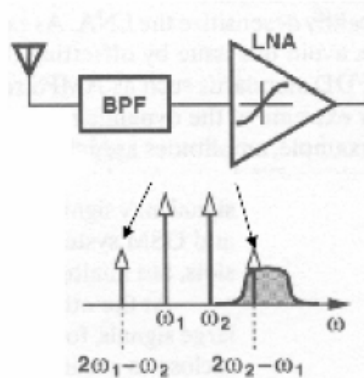
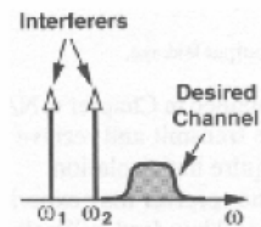
- » 噪声系数通常被定义为电路对信号信噪比的影响程度：

$$F = \frac{\text{SNR}_{in}}{\text{SNR}_{out}}$$



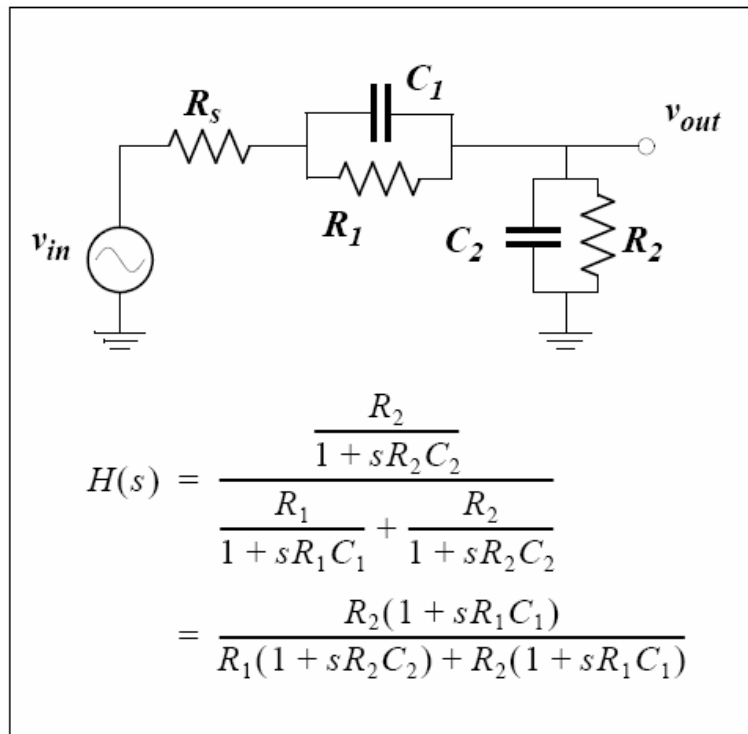
课程内容

- 电路的非线性
 - 什么是线性/非线性?
 - 电路本身就是非线性的
 - » 三极管集电极电流与基极电压的关系
 - » MOS管漏极电流与栅极电压的关系
 - » PN结电容
 - 非线性电路的简单模型
 - » $y = a_0 + a_1x^1 + a_2x^2 + a_3x^3$
 - 非线性对系统的影响
 - » 增益压缩
 - » 谐波失真
 - » 交调(Cross-Modulation)
 - » 互调(Intermodulation)失真
 - 有关指标
 - » 1-dB压缩点(1-dB Compression Point)
 - » 3阶截点(3rd-order Intercept Point, IP3)



课程内容

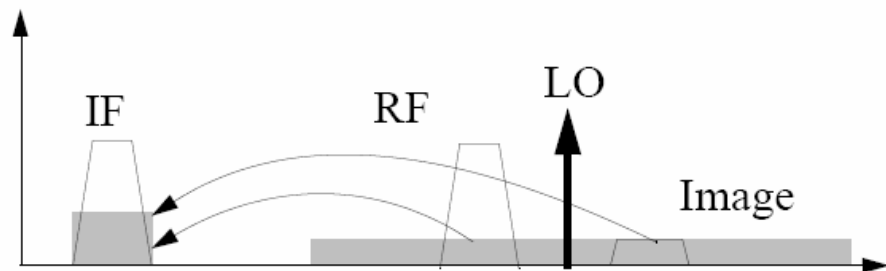
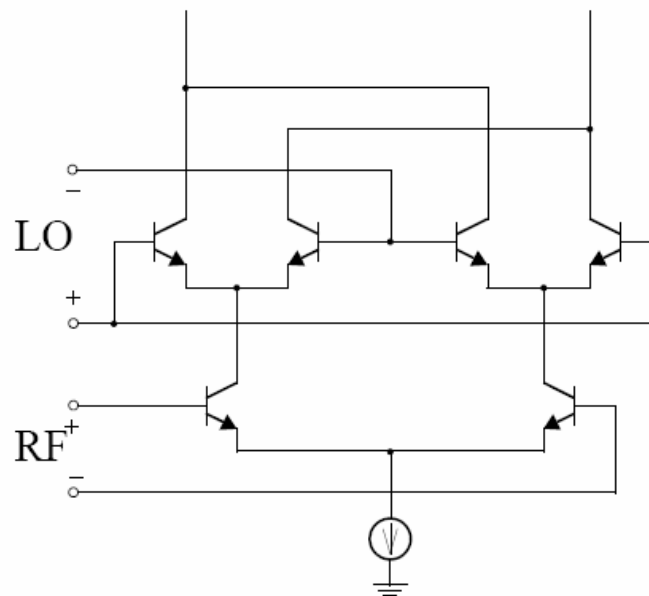
- 小信号放大器设计
 - 宽带放大器 (DC-GHz)
 - » 带宽受限的原因
 - » 极点及其抵消技术
 - » 密勒效应 (Miller Effect)
 - » 分布式放大器
 - 传统微波放大器
 - » 输入、输出匹配网络设计
 - » 最大功率增益/最小噪声系数/宽带
 - » 稳定系数
 - » Smith Chart 的使用
 - CMOS/Bipolar 低噪声放大器 (LNA)
 - » 输入阻抗匹配的实现
 - » 噪声分析、噪声系数的计算和优化
 - » 在片电感？单端 vs. 差分？
 - » 还有那些因素影响噪声系数？



课程内容

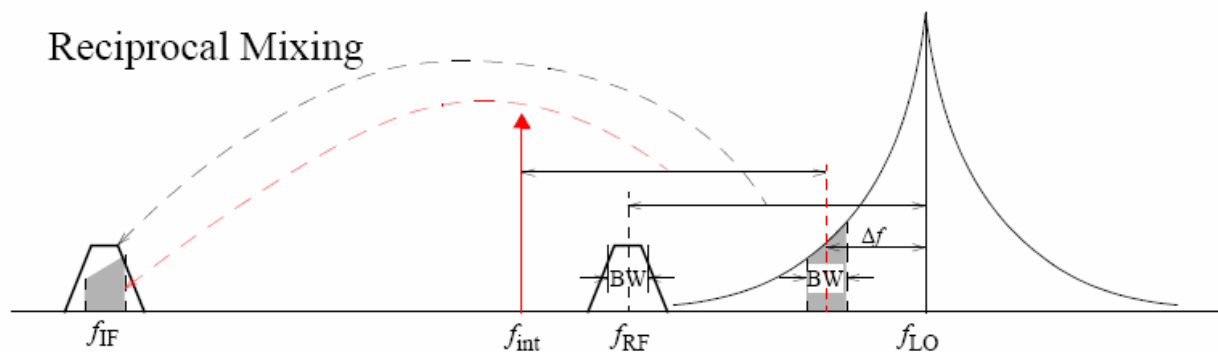
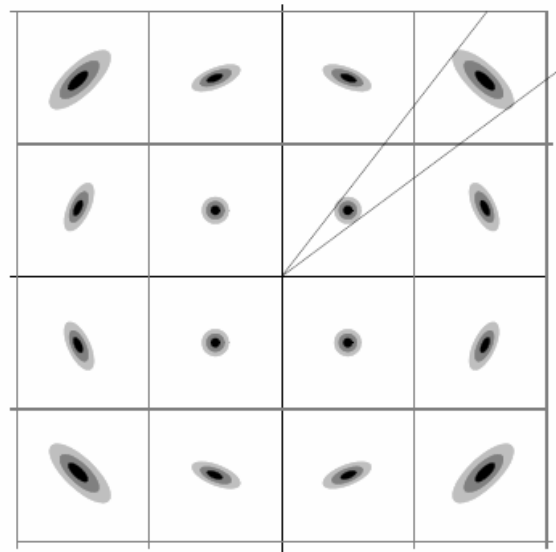
- 射频混频器 (Mixer)

- 工作原理：非线性与时变系统
 - » 单平衡混频电路
 - » **Gilbert** 乘法器
- 线性度的考虑
 - » 处理最大幅度的射频信号
 - » 使用反馈
 - » 使用中心偏移的跨导组
- 噪声的考虑
 - » 单边带 (SSB) 与双边带 (DSB) 噪声系数
 - » 跨导电路的噪声
 - » 开关电路的噪声
 - » 减小噪声的策略



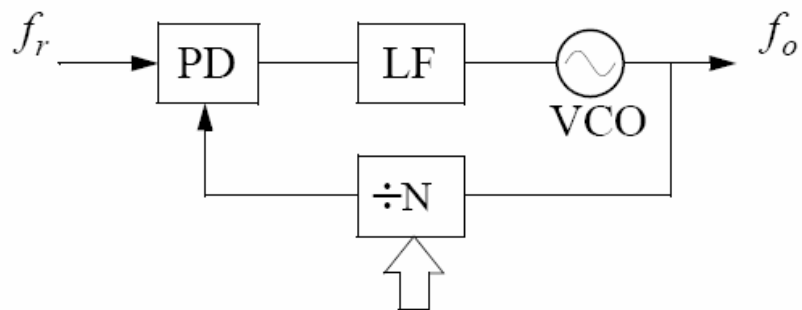
课程内容

- 振荡器与频率合成
 - 振荡器的起振原理
 - 正交信号的产生
 - 振荡器的 Q 值及相位噪声
 - » 相位噪声产生原因
 - » 倒易混频(Reciprocal Mixing)
 - » 相位误差
 - » 降低相位噪声的措施



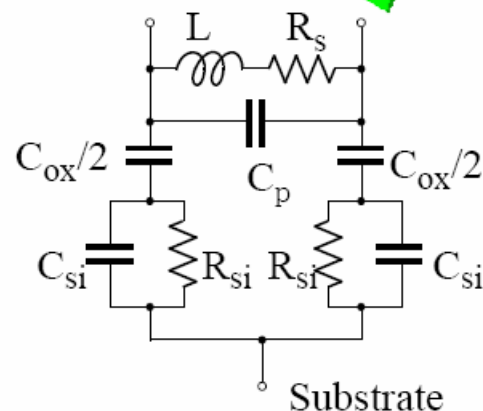
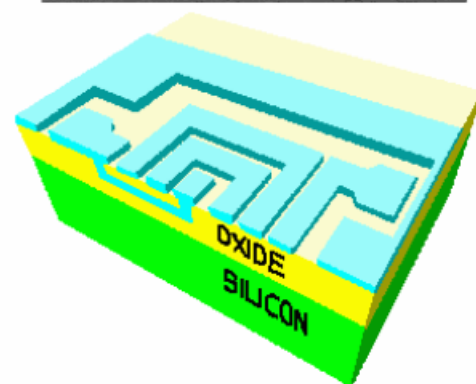
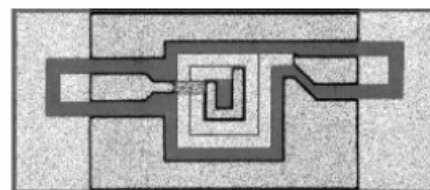
课程内容

- 频率合成
 - » PLL基本原理
 - » PLL传输噪声特性
 - » PLL环路元件
 - » 整数与小数分频
- 射频功率放大器 (Power Amplifier)
 - 分类: A, B, C, D, E, F
 - 功率增益, 最大输出功率, 效率
 - 线性度
 - » 互调分量(IM3, IM5 etc.)或谐波抑制
 - » ACP (Adjacent Channel Power, 已调制信号)
 - » EVM (Error Vector Matgnitude, 误差向量幅度)
 - 大信号阻抗匹配
 - 线性化技术: 前馈、反馈、预失真等



课程内容

- 集成电路工艺及元件: MOS管积累、耗尽、反型, 亚阈值、线性区、饱和区
 - » 漏电流和跨导的计算
 - » MOS电容和S/D结电容
 - » 短沟道效应
 - » f_T 和 f_{Max}
- CMOS工艺中的电阻电容
- CMOS工艺中的电感
 - » 模型
 - » 电感值的计算, Q值的优化
 - » 有源电感
- 尺寸按比例缩小 (Scaling Down) 的影响
- 其它射频集成电路工艺



课程内容

- 微波工程复习
 - LC 谐振电路、Q 值、寄生元件及其影响
 - 分布的传输系统—传输线，波的概念
 - 史密斯圆图 (Smith Chart) 原理及应用
 - 阻抗变换及匹配，匹配网络的设计
 - S-参数
- 先修课程
 - 电子线路 (或模拟电路、通信电子线路等同类课程)
 - 射频/微波技术
 - 无线通信、数字通信

课程内容

- 上课时间、地点

- 信息学院：每周四下午第1-4节课，东南院101教室

- IC学院：每周日下午第1-4节课，中山院301教室

课程内容

- 教材

- 李智群 王志功 编著 《射频集成电路与系统》 科学出版社 2008.7

- 参考书

- Thomas H. Lee, *The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits*, Cambridge University Press.
- Behzad Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice Hall.
- *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design*, Guillermo Gonzalez, Prentice Hall, 1997.
- 池保勇等：《CMOS射频集成电路分析与设计》
- 谢嘉奎等：《电子线路》
- 顾宝良：《通信电子线路》
- 无线(数字)通信与微波技术方面的教科书与参考书

教材与参考书

- 期刊

- **IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC)**
- **IEEE Transactions on Electron Devices**
- **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**
- **IEEE Transactions on Circuit and Systems II: Analog and Digital Signal Processing**
- **IEE Electronics Letters**

- 会议

- **ISSCC: International Solid-State Circuits Conference**
- **CICC: Custom Integrated Circuits Conference**
- **IMS/RFIC: (Microwave Theory and Techniques Society, MTT-S)**

RFIC相关IEEE/IEE期刊和会议

- » **International Microwave Symposium (IMS)**
- » **Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)**
- **IEDM: International Electron Devices Meeting**
- **ISCAS: International Symposium on Circuits and Systems**
- **RAWCON: Radio and Wireless Conference**
- **Symposium on VLSI Circuits**