射频集成电路基础

闫娜

yanna@fudan.edu.cn

复旦大学微电子学院

参考书目

作者	教材或参考资料名称	出版社	出版年月
陈邦媛	射频通信电路	科学出版社	2006年8月第二版
Behzad Razavi	RF Microelectronics（影印版）	清华大学出版社	第一版/第二版
池保勇等	CMOS射频集成电路分析与设计	清华大学出版社	2006年11月第一版
Reinhold Ludwig等	射频电路设计-理论与应用	电子工业出版社	2002年5月第一版
Thomas H.Lee	The Design of CMOS Radio-Frequency Interated Ciruits (Second Edition)	电子工业出版社（英文版）	2005年5月
David M. Pozar	Microwave Engineering (Third Edition)	电子工业出版社（英文版）	2008年3月

课程内容

- 第一章　射频与无线技术简介
- 第二章　RF设计中的基本概念
- 第三章　无源RLC网络
- 第四章　无源元件
- 第五章　Smith圆图
- 第六章　匹配理论
- 第七章　接收发送机架构
- 第八章　低噪声放大器
- 第九章　混频器
- 第十章　功率放大器
- 第十一章　振荡器
- 第十二章　锁相与频率合成技术
- 第十三章　相关软件介绍

第一章　绪论

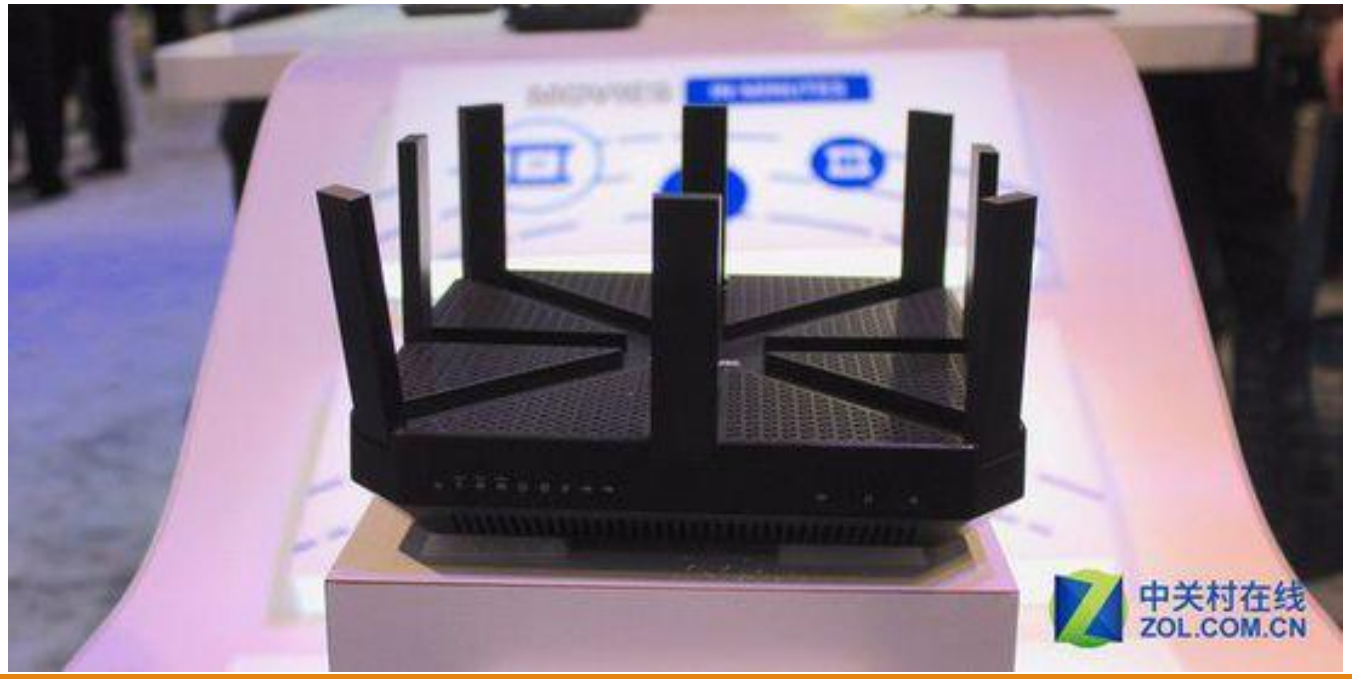
- 射频与无线技术简介
  - 通信技术的发展及应用
  - 通信系统的组成
  - 通信电路的射频设计
  - 射频设计已成为通信电路发展的瓶颈

射频技术的应用

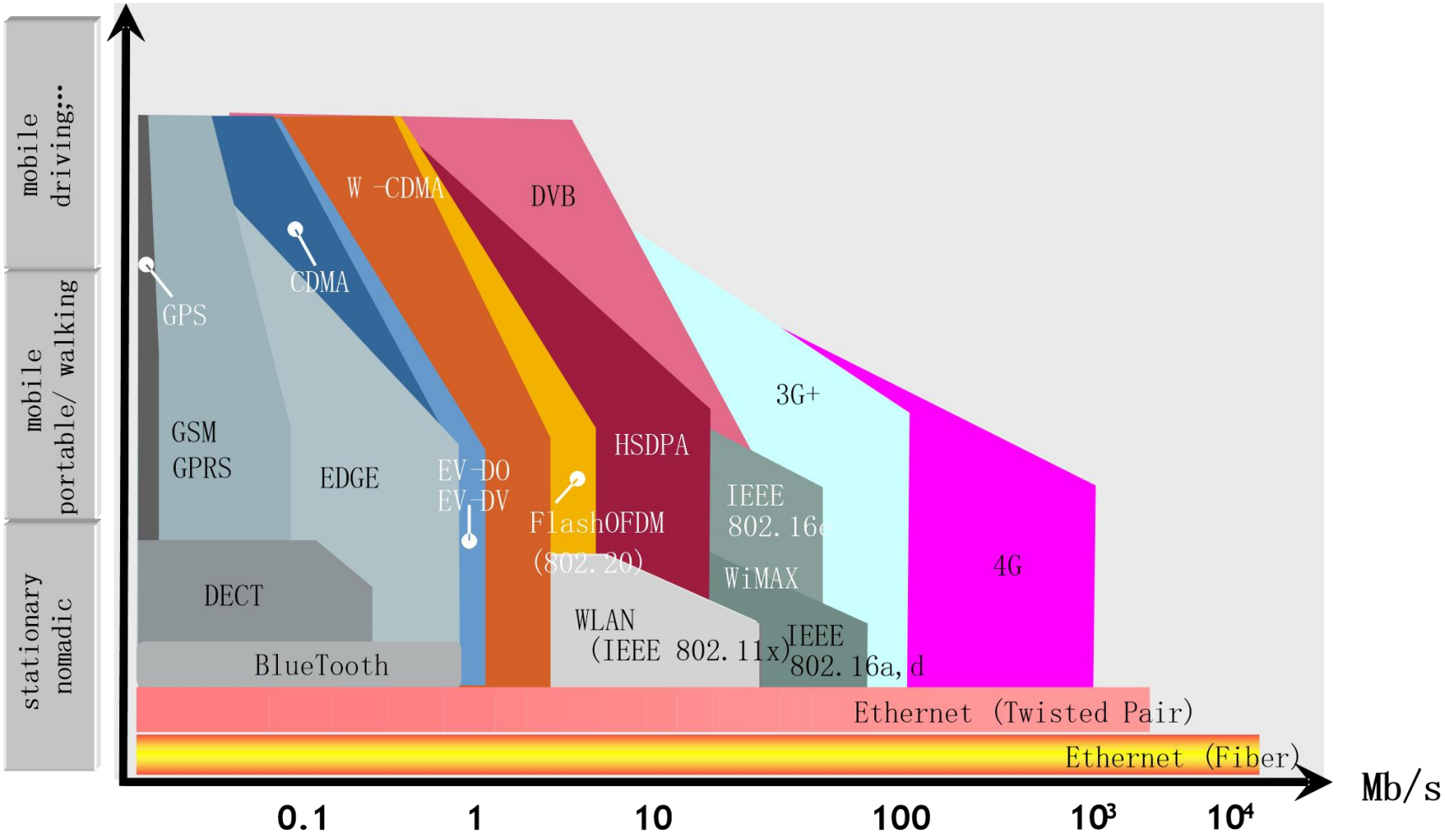
- 无线局域网（WLAN 802.11a/b/g/n…./ad(60G)/ah）
- 全球定位系统（GPS）
- 射频识别（RFID）
- 移动通信网络（GSM/TD-SCDMA/WCDMA/CDMA2000/LTE/NB-IOT/5G）
- 家庭卫星网络（house satellite network）
- 其他近距离无线通信：
  - Zigbee（802.15.4）
  - UWB（3.1-10.6GHz）
  - BlueTooth（802.15.1）
  - NFC（13.56MHz）
- 微波通信：光纤通信、卫星通信、微波中继通信

全球首款802.11ad无线路由器 by TP-Link

- 支持802.11ad、11ac、11n标准；
- 11ad@60GHz，近距离应用，可达4.6Gbps的无线传输速率，这使得用户传输一部4K超清电影仅需5分钟，而传输上千张照片仅需几秒钟。
- 11ac/n，中远距离无线应用，其中在5GHz频段可提供1733Mbps的无线传输速率，并且支持MU-MIMO技术；而在2.4GHz频段可提供600Mbps的无线传输速率。



Degree of mobility



不断发展的通信技术

- 1820年 Oersted 发现电流会产生磁场；
- 1831年 Faraday发现导线作切割磁力线运动产生感应电流；
- 1864年 Maxwell提出电磁场方程组，预言电磁波存在；
- 1887年 德国科学家赫兹的电磁波辐射实验，辐射出1000MHz电磁波；
- 1894年 O. Lodge发明粉末检波器，在牛津检测到150码远发出的无线信号；

- 1895年 Marconi 发明的无线电报，传输2公里；
- 1897年 Marconi申请无线电报专利，建立无线电报公司；
- 1901年12月12日 Marconi在加拿大纽芬兰岛收到从英国Cornwall发出的无线信号，传输距离1700mile.
- 1900年 专利《调谐电话》获得批准，专利号为No.7777；同年公司改名为Marconi公司；
- 1907年 获诺贝尔物理奖；
- 1904年 Flemin发明电子二极管；
- 1906年 De Forest发明电子三极管放大；
- 1920年 AM广播在美国匹兹堡开通；

Marconi

在一次大战中 E. Armstrong发明超外差AM接收机；
1933年 E. Armstrong发明FM；
1929年 美国人Zworykin发明电视；
1933年 英国BBC广播电视开通；
1947年 Brattain, Bardeen, Shockley发明晶体管；

W. SHOCKLEY
(1910-1989)

J. BARDEEN
(1908-1991)

W. H. BRATTAIN
(1902-1987)

1958年 Kilby和Noyce 发明集成电路；

1962年 Telstar I 卫星发射，转播欧、美之间电视广播；

1965年 发射商用通信卫星；

70年代初 Bell实验室R. Frenkiel等提出蜂窝式无线移动通信网概念；
1983年 出现第一代商用蜂窝移动通信系统；
目前第二代→第三代→三代后→ 第四代→ 第五代；

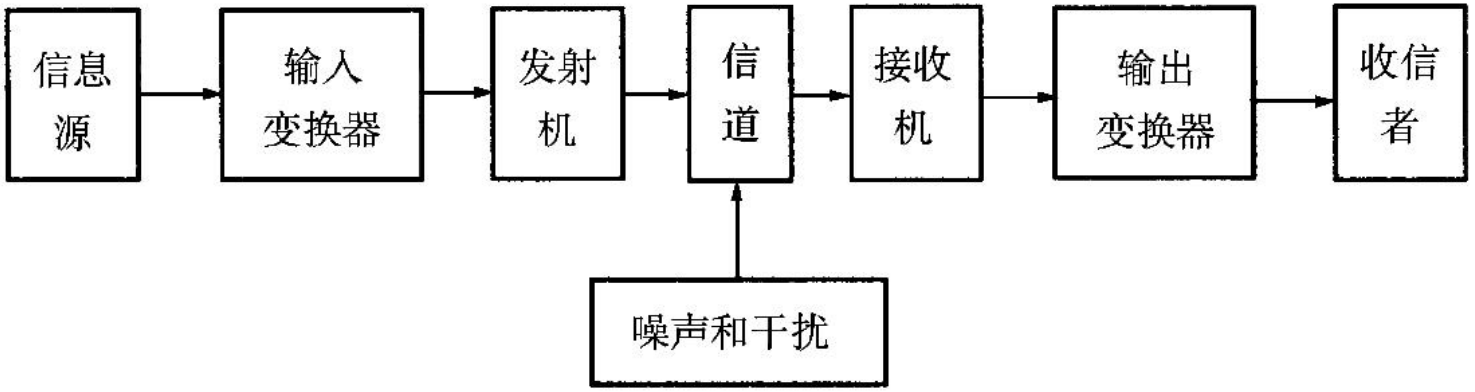
Clinton总统給R. Frenkiel 授奖

造就当今移动通信辉煌局面的应首推微电子技术和射频技术

第一章　绪论

- 射频与无线技术简介
  - 通信技术的发展及应用
  - 通信系统的组成
  - 通信电路的射频设计
  - 射频设计已成为通信电路发展的瓶颈

通信系统的组成



两种变换：

1、非电信号　　电信号（基带信号）

基带信号：模拟或数字，低频

2、调制与解调：基带信号　　通带信号

通带信号：高频，窄带

- 调制的目的：
  - 有效的发射电磁波
    - 天线长度&信号波长相比拟（至少为1/10）
    - 话音频率300~3400Hz ~ 300km
    - 900MHz ~ 33cm
  - 有效的利用频带
- 调制方式:
  - 调幅 — 基带信号控制载波幅度
  - 调频 — 基带信号控制载波频率
  - 调相 — 基带信号控制载波相位

信道：有线（频段范围广）、无线

无线频段：

名　称	频　段	波　长
中频（MF）	300kHz~3MHz	10^3~10^2(m)
高频（HF）	3MHz~30MHz	10^2~10(m)
甚高频（VHF）	30MHz~300MHz	10~1(m)
特高频（UHF）	300MHz~3GHz	1.0~0.1 (m) (分米波)
超高频（SHF）	3GHz~30GHz	0.1~0.01 (m)（厘米波）
极高频（EHF）	30GHz~300GHz	0.01~0.001(m)（毫米波）

无线信道的恶劣环境

- **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**
  - 接收信号微弱介质损耗
  - 多途径传输造成的多径衰落
  - 敞开信道受到的各种干扰：包括同频干扰和临近信道干扰
  - 移动接收中的多普勒频移（Doppler Shift）和频谱色散
    - 多普勒频移：由于发射机和接收机间的相对运动，接收机接收到的信号频率与发射机发出的信号频率之间的差值
  - 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

- 色散信道（dispersive channel）分为时间色散信道和频率色散信道。

时间色散信道——当发射端发射一个极窄的脉冲信号时，接收端接收到这个信号（经过不同路径传播的）多个副本，在时间上展宽——就是多径了；

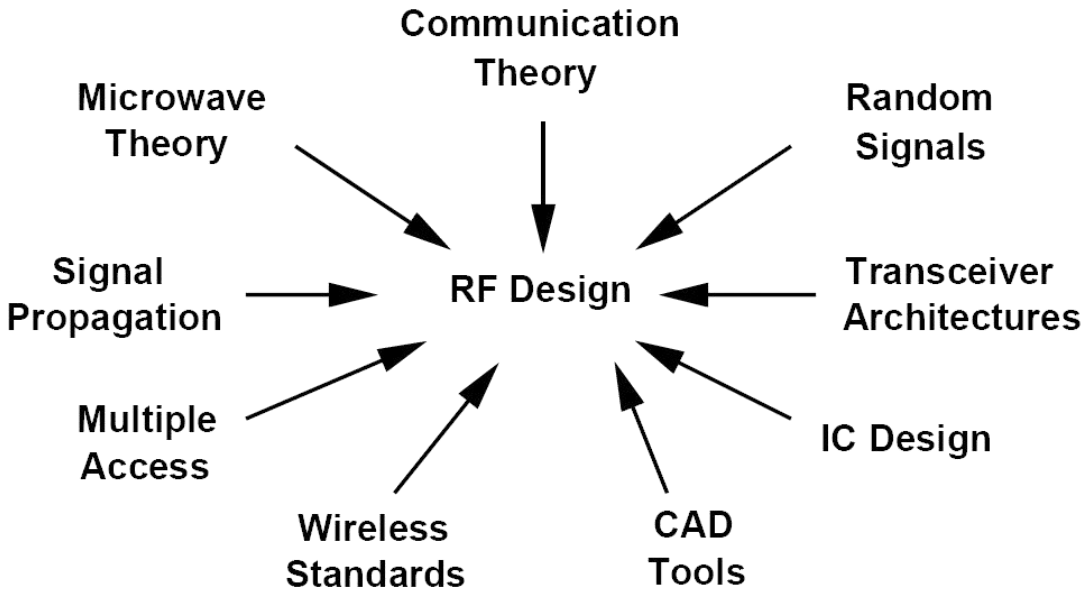
频率色散信道——在多径环境中，发射端和接收端之间存在相对运动， 并且/或者，该传播信道中有其它运动的反射体、散射体，及障碍物等。 由于多普勒效应，各个路径的信号产生不同的（在非相关散射条件下， 统计独立的）多普勒频移。接收天线处合成信号的效果就是接收信号的频谱展宽了。如果发射的是一个单频信号，就可以明显地看到接收信号的频谱变化。

第一章　绪论

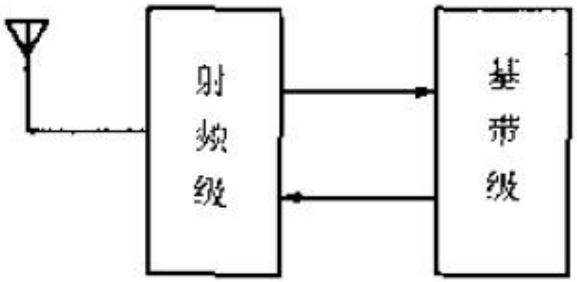
- 射频与无线技术简介
  - 通信技术的发展及应用
  - 通信系统的组成
  - 通信电路的射频设计
  - 射频设计已成为通信电路发展的瓶颈

什么是射频？

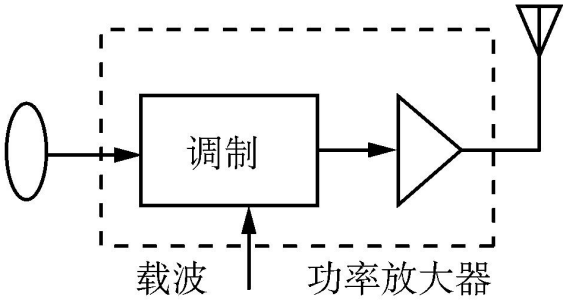
- RF—radio frequency
- 射频——可以无线发射的频率，射频电路的频率不是很低，在电路设计时无法直接用基尔霍夫定理；但射频电路的频率又不是特别高，不必完全使用电磁场的分析方法
- frequency: several hundred MHz to low microwave frequency band
- 多学科领域



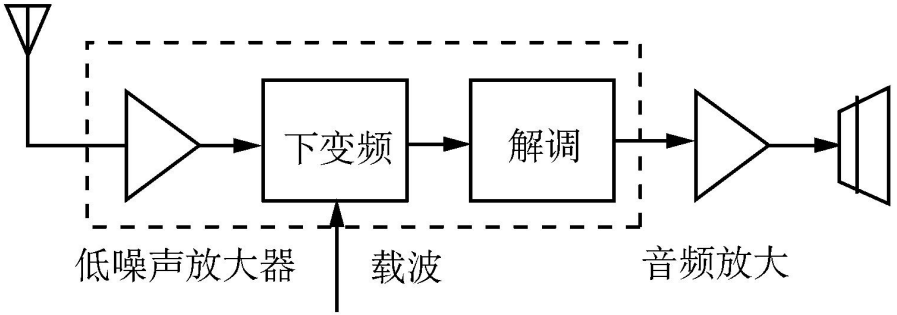
通信电路的射频设计



无线移动通信机

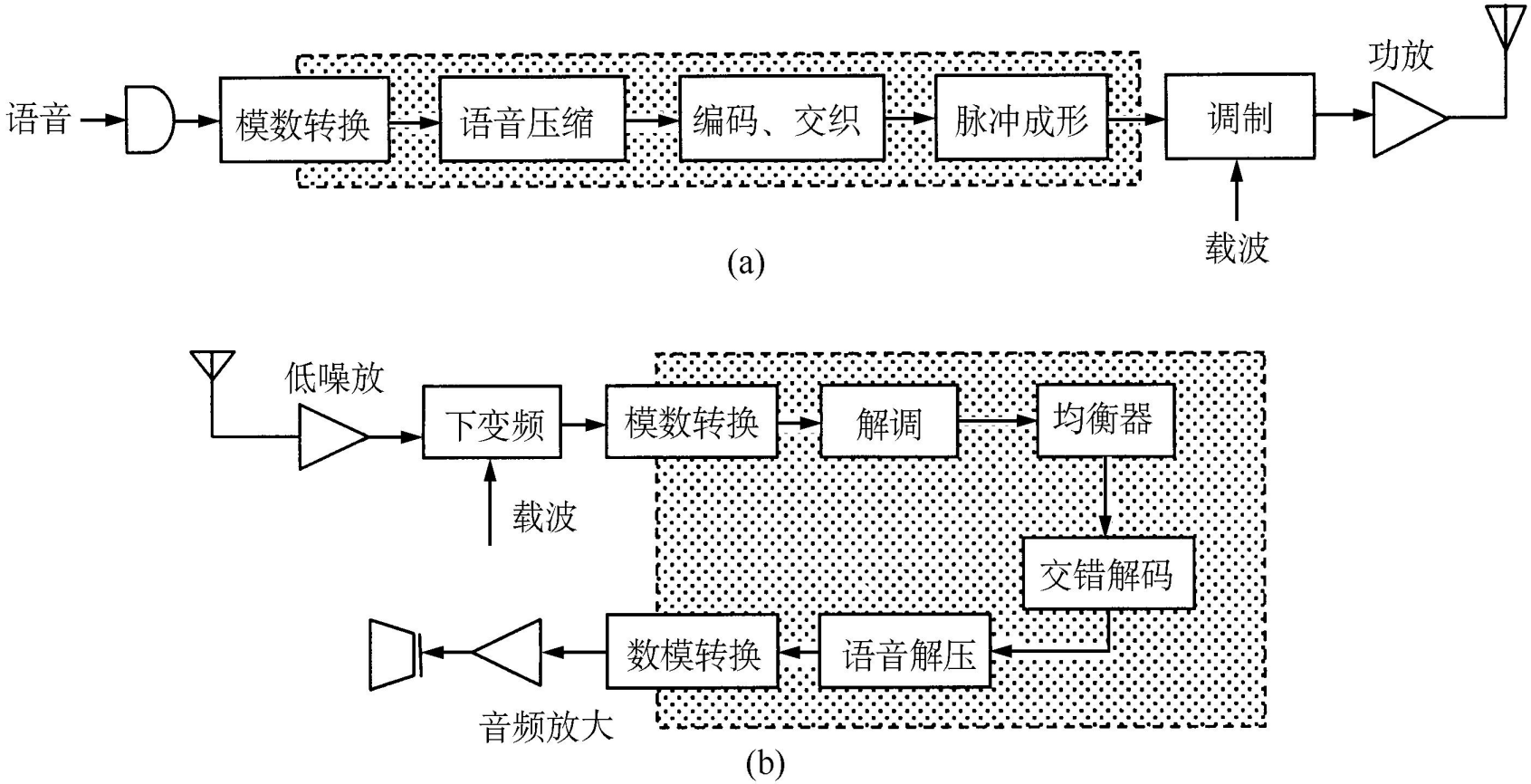


(a) 发射机



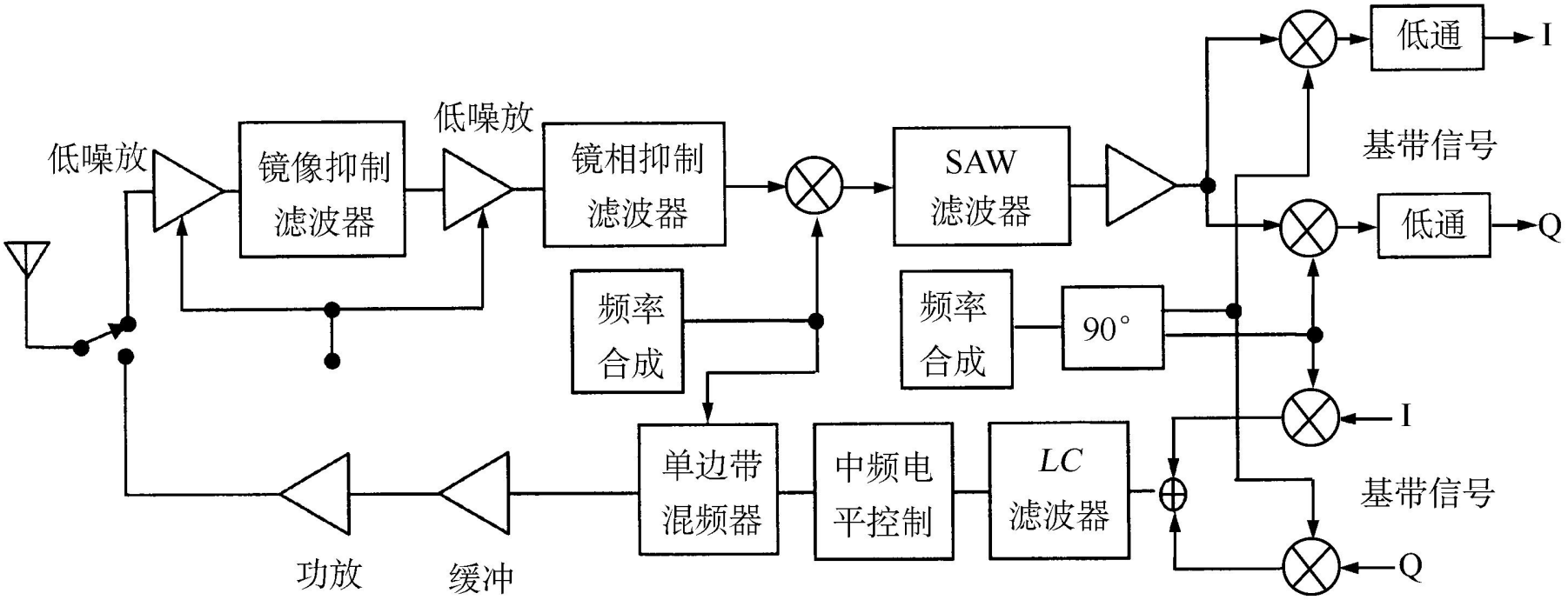
(b) 接收机

通信电路的射频设计



数字通信机的射频级电路方框图

通信电路的射频设计



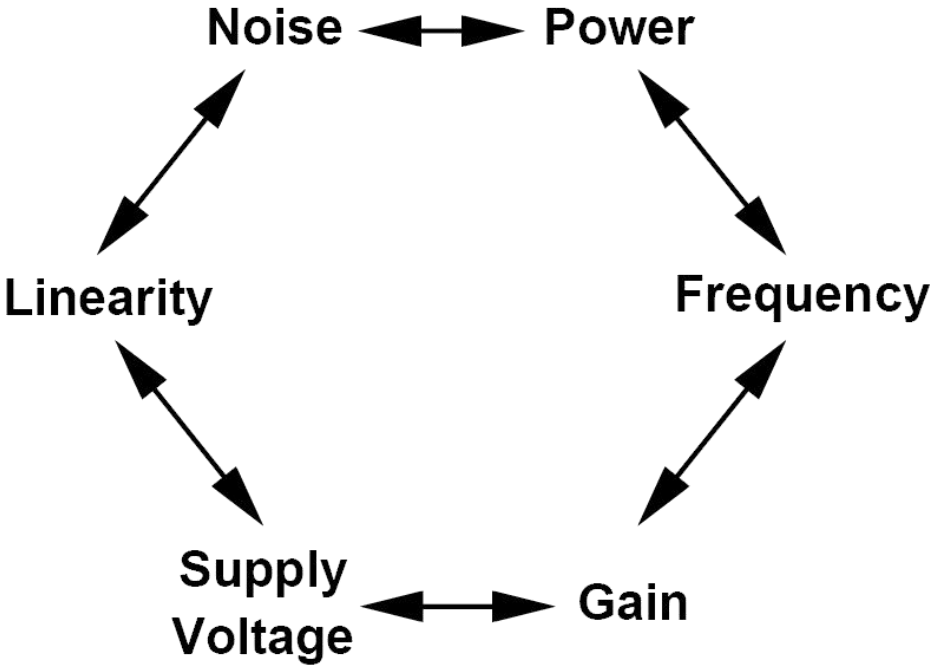
无线数字手机的射频级电路

射频电路设计要求

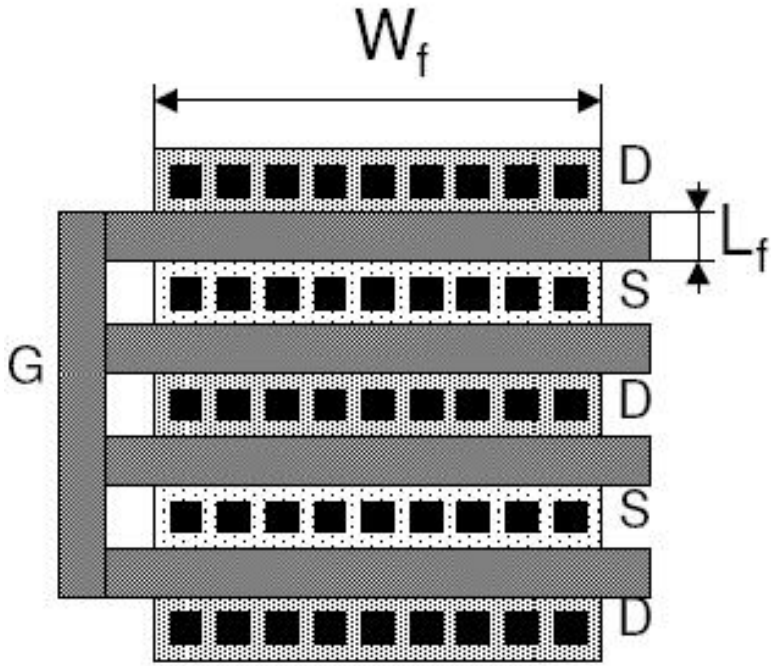
- 良好的选择性
- 低噪声、高动态范围
  - 信号小-噪声
  - 信号大-非线性度
- 接收机对杂散频率信号有良好的抑制能力
  - 多次变频
- 本振信号应具有低的相位噪声
- 发射机必须严格限制带外衰减
- 发射机功率放大器具有高的功率增加效率（PAE）
- 低电压、低功耗

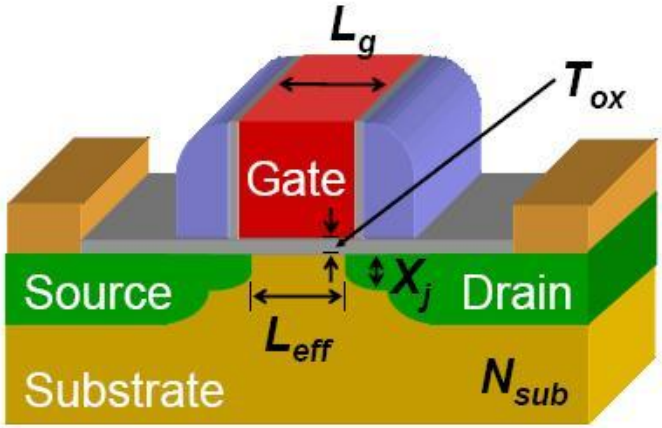
射频电路设计要求

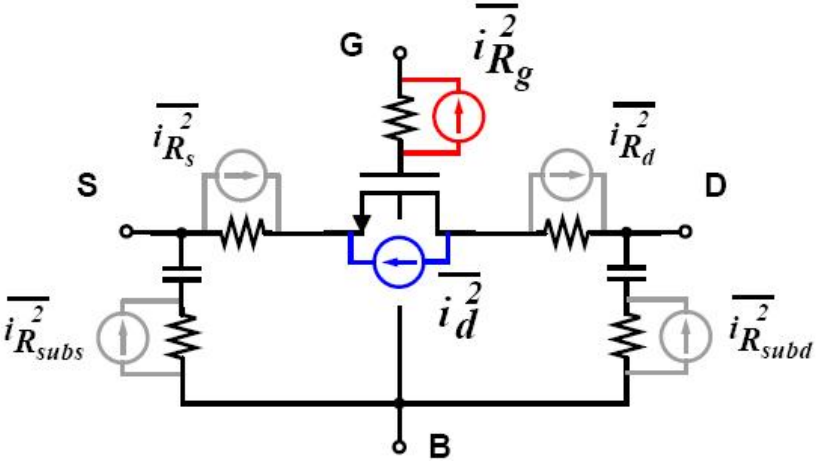
- 射频设计六边形

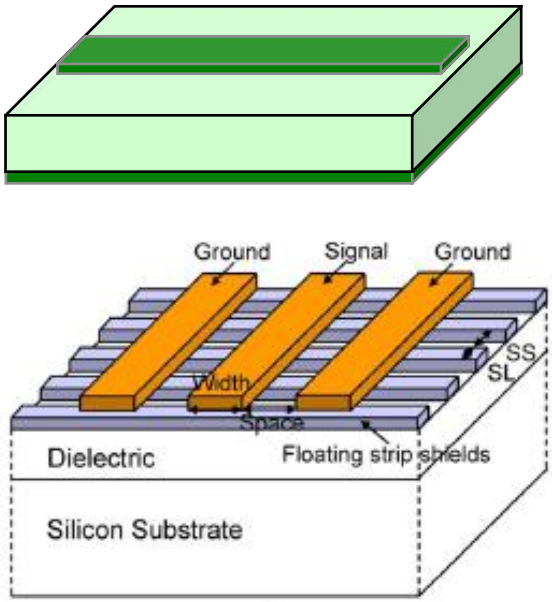


- 设计工具：
  - Agilent ADS & RFDE， Cadence Spectra RF， Mentor Eldo RF， Synopsys Hspice RF， etc.

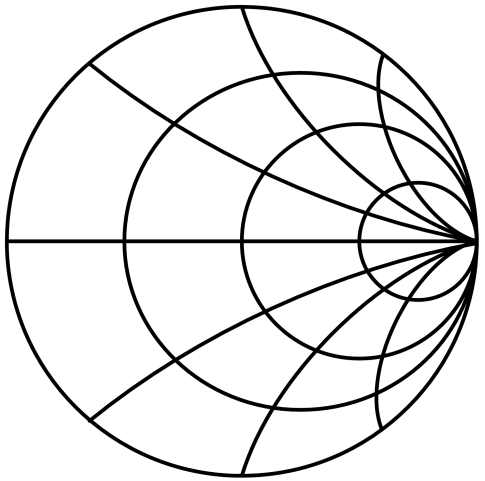

W_f
D
L_f
S
G
D
S
D


L_g
T_{ox}
Gate
Source
X_j
Drain
L_{eff}
Substrate
N_{sub}

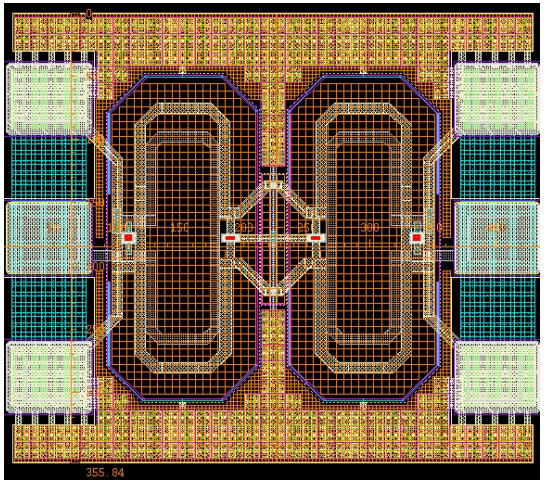

G
$\overline{i_{R_g}^2}$
$\overline{i_{R_s}^2}$
$\overline{i_{R_d}^2}$
S
D
$\overline{i_{R_{subs}}^2}$
$\overline{i_d^2}$
$\overline{i_{R_{subd}}^2}$
B

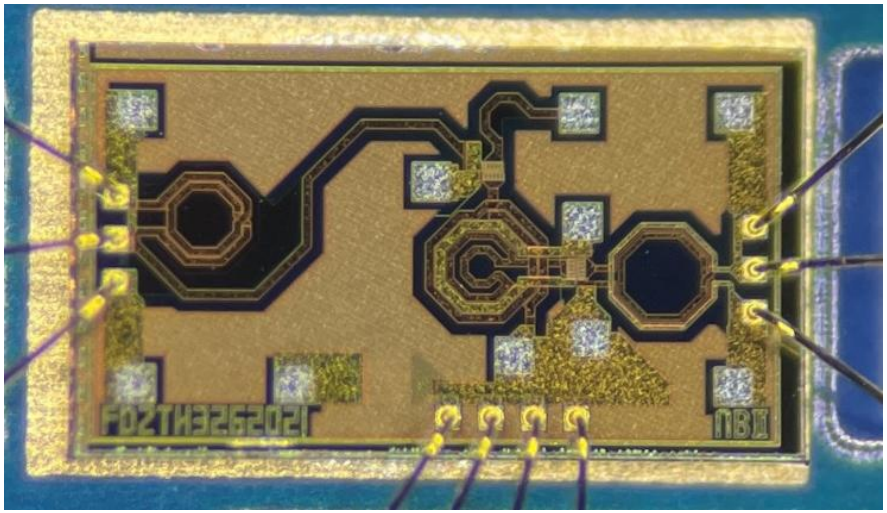

Ground
Signal
Ground
SS
SL
Width
Space
Dielectric
Floating strip shields
Silicon Substrate

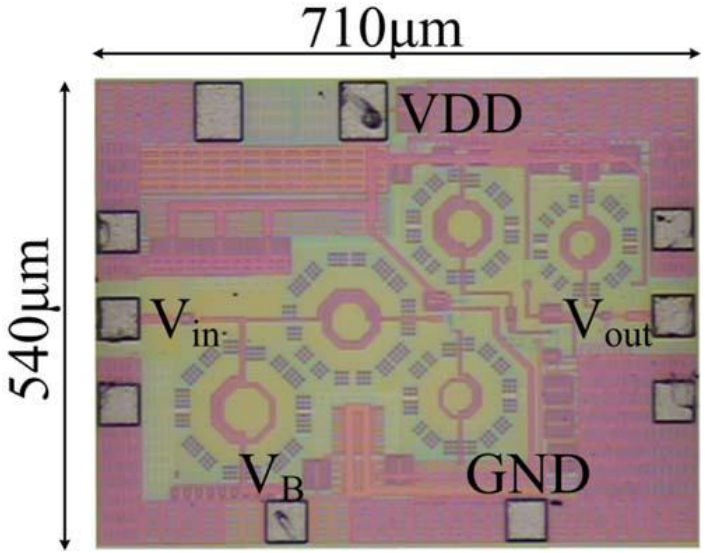
传输线

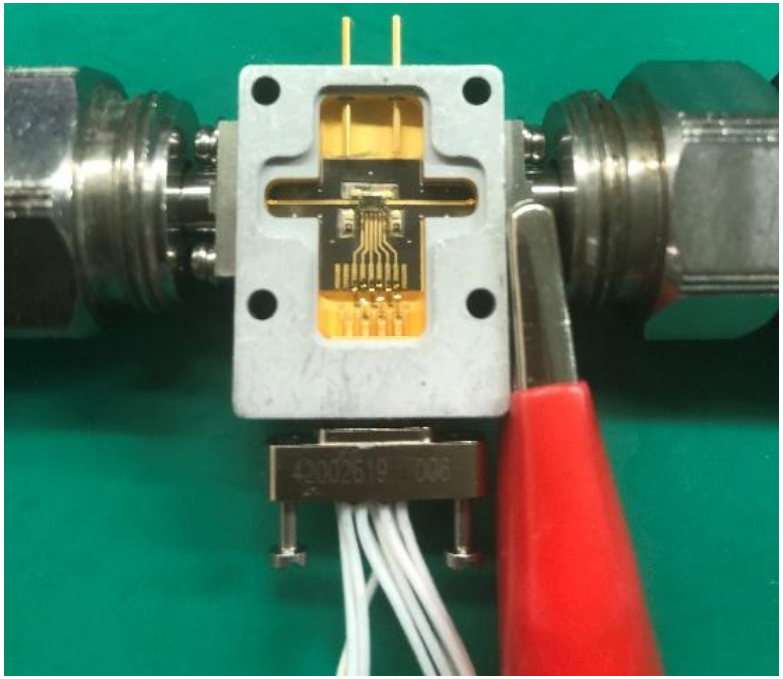


Smith 圆图

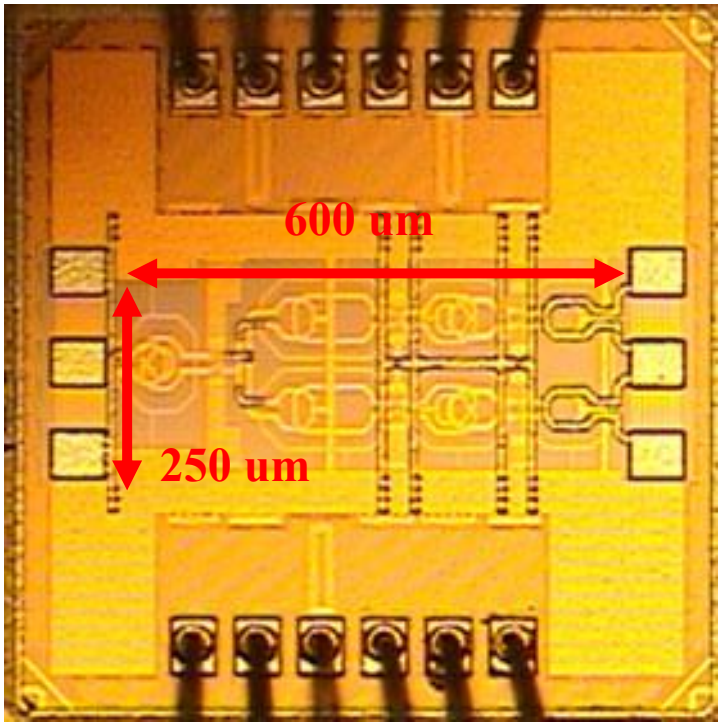


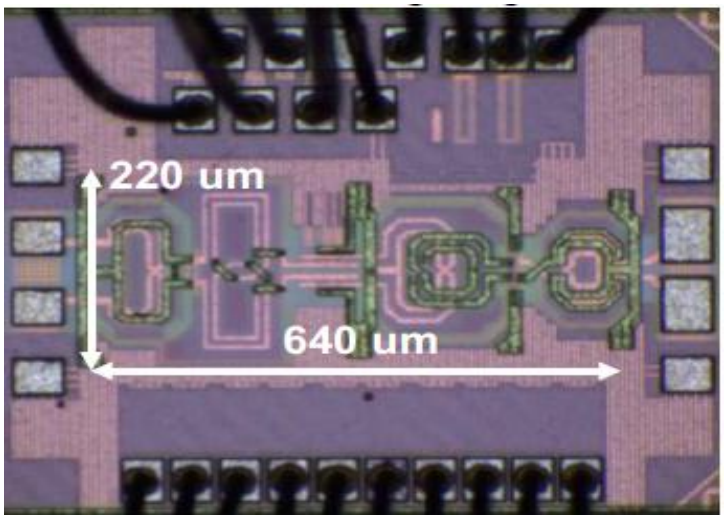


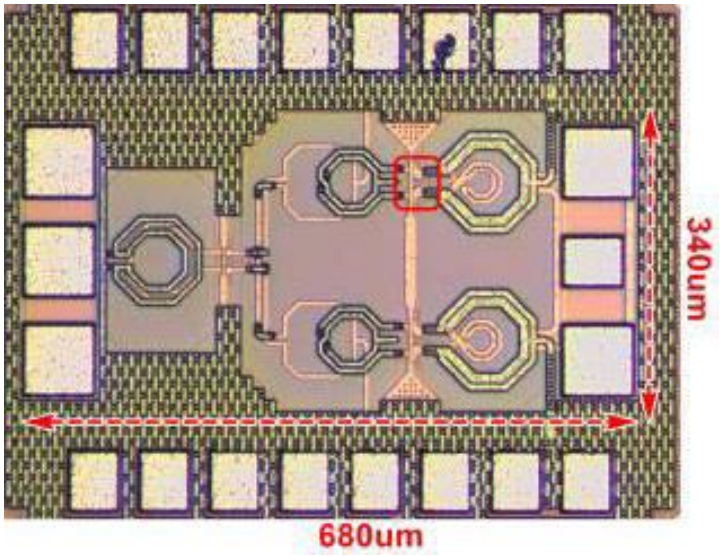




低噪声放大器

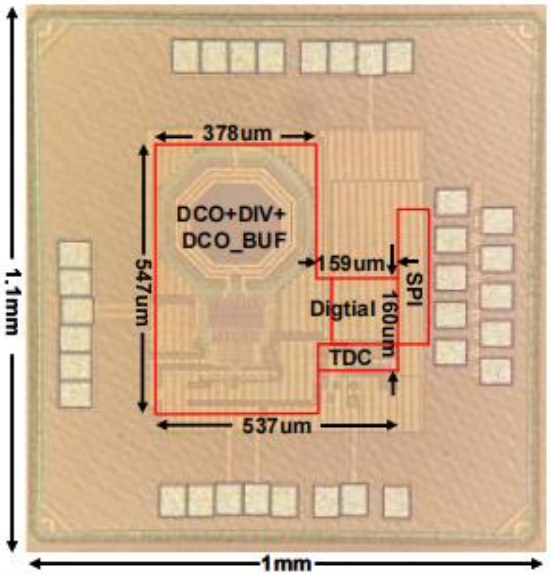


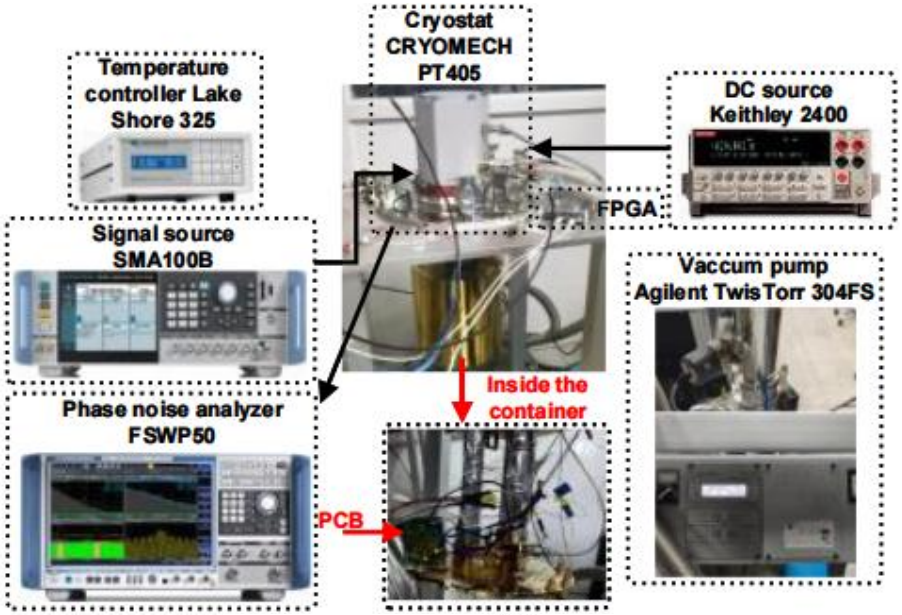


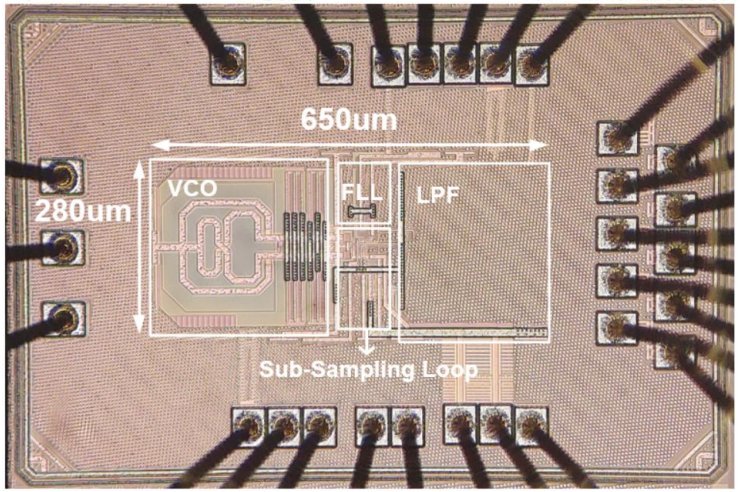


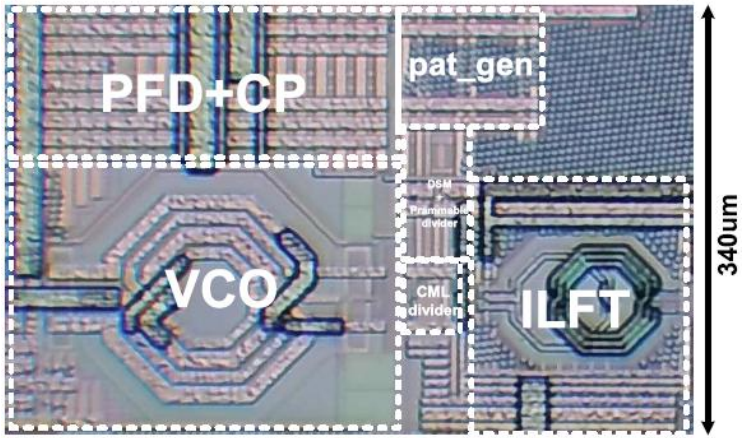
功率放大器

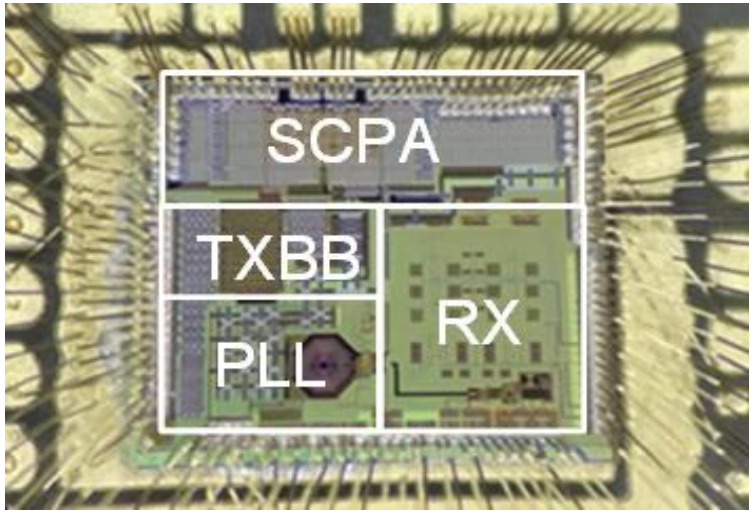
频率综合器

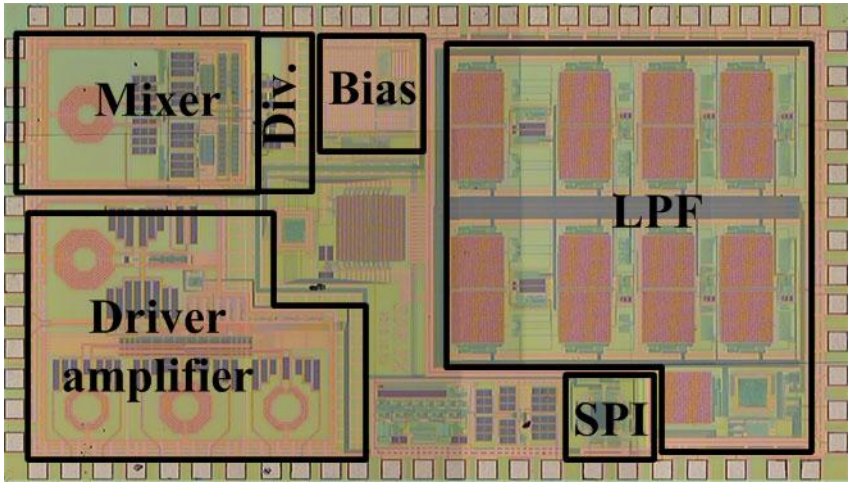

1.1mm
378um
DCO+DIV+
DCO_BUF
547um
159um
SPI
Digtial
160um
TDC
537um
1mm

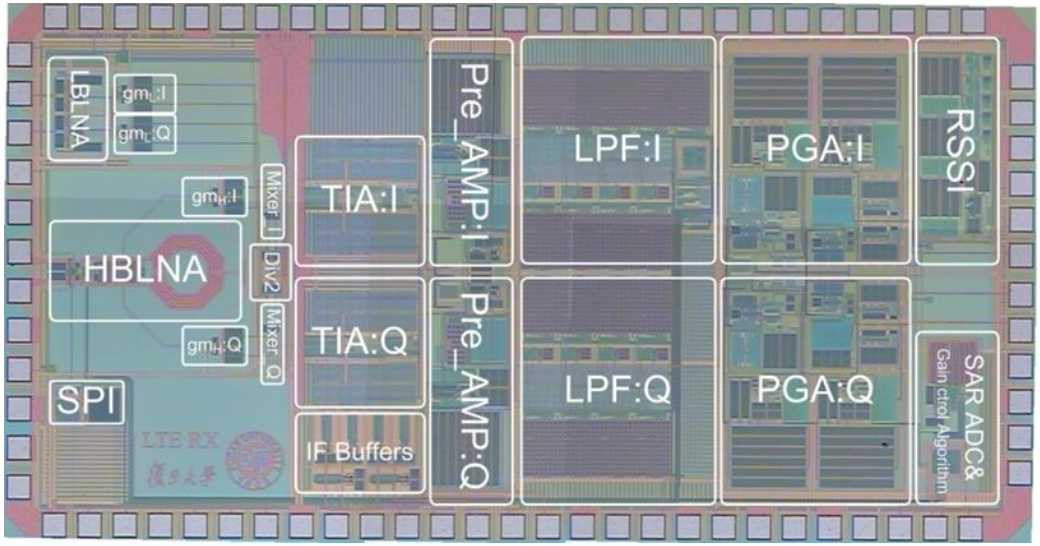

Temperature controller Lake Shore 325
Cryostat CRYOMECH PT405
DC source Keithley 2400
FPGA
Signal source SMA100B
Vaccum pump Agilent TwisTorr 304FS
Inside the container
Phase noise analyzer FSWP50
PCB
500um


650um
280um
VCO
FLL
LPF
Sub-Sampling Loop

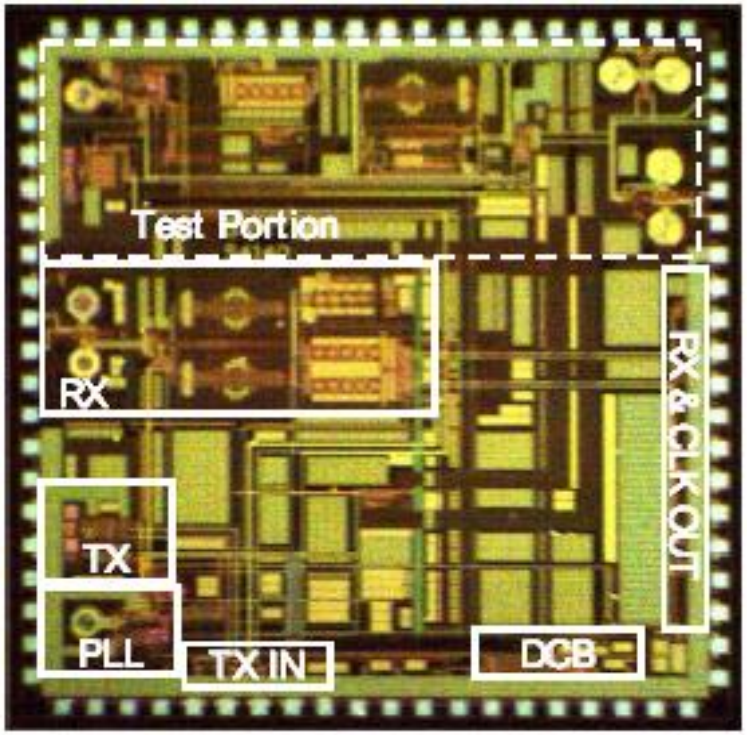

PFD+CP
pat_gen
DSM
Prammeable divider
VCO
CML divider
ILFT
340um


SCPA
TXBB
PLL
RX

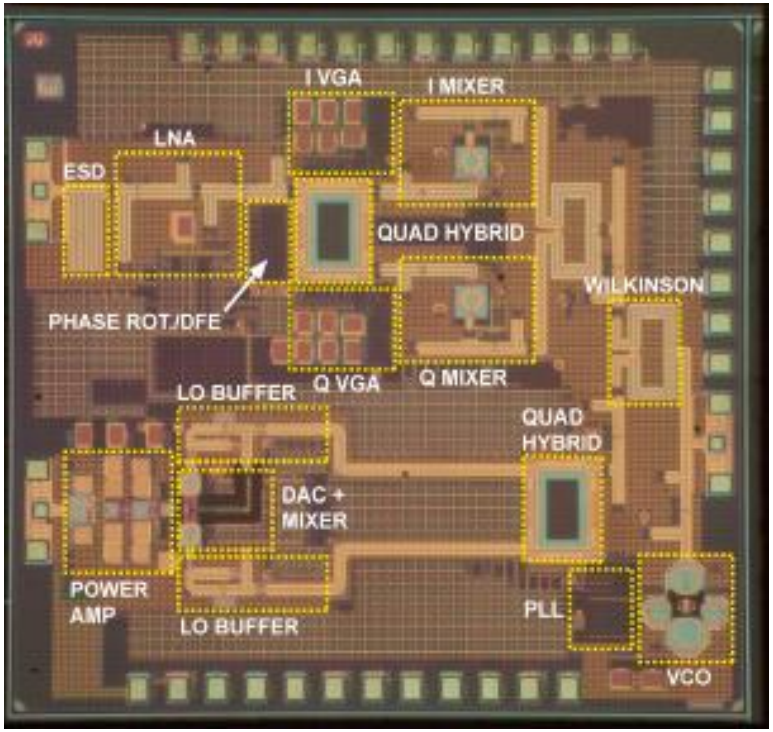

Mixer
Div.
Bias
LPF
Driver amplifier
SPI


LBLNA
HBLNA
Mixer_I
Div2
Mixer_Q
TIA:I
TIA:Q
IF Buffers
Pre_AMP:I
Pre_AMP:Q
LPF:I
LPF:Q
PGA:I
PGA:Q
RSSI
SAR ADC&
Gain ctrol Algorithm
SPI

收发前端



超宽带（**UWB**）收发机



60GHz Transceiver

射频集成电路中的主要元件

- Low Noise Amplifiers (LNA's)
- Power Amplifiers (PA's)
- Mixers (up-converters and down-converters)
- Oscillators (fixed, VCO's and CCO's)
- Transmit/receive switches
- On-chip inductors
- On-chip transformers
- High-frequency capacitors
- Distributed amplifiers

射频电路中的单位

1. dB

某些量的两种表示 → 自然表示 / dB表示

电压增益 $A_V = 5 \longrightarrow A_V = 20\log 5 = 14dB$

功率增益 $G_P = 25 \longrightarrow G_P = 10\log 25 = 14dB$

注意 ① dB表示的量是无量纲的，是比值。

② 电压比的系数是20，功率比是10

噪声系数 F=4 —— 功率比 $\longrightarrow NF = 10\log 4 = 6dB$

当输入输出阻抗相同时，$G_P = \dfrac{P_o}{P_i} = \dfrac{V_o^2 / R_o}{V_i^2 / R_i} = \dfrac{V_o^2}{V_i^2} = A_V^2$

用dB 表示的功率增益、电压增益数值相同

2. dBm与dBmV

dB(功率) $10\log\frac{P_1}{P_2}$	dBW	$10\log\frac{P}{1.0W}$
	dBm	$10\log\frac{P}{1.0mW}$
dB（电压） $20\log\frac{V_1}{V_2}$	dBV	$20\log\frac{V}{1.0V}$
	dBmV	$20\log\frac{V}{1.0mV}$
	dBμV	$20\log\frac{V}{1.0\mu V}$

注意

① dBm——对应功率
dBmV——对应电压
} 表示的量有单位

② 电压、功率的系数不同

采用dB的优点

将乘法运算变为加法

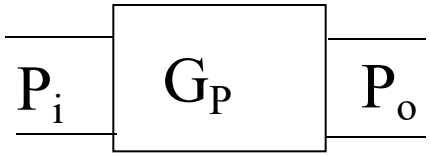
$$G_P = G_{P1} \times G_{P2} = 25 \times 25 = 625$$

$$G_P = G_{P1}(dB) + G_{P2}(dB) = 14 + 14 = 28dB$$

注意　① dB与dB可加减，但不能乘除

② dBm与dBm不可相加，但可以相减，结果为dB

③ dB与dBm间可加减，结果为dBm



$$P_o = G_P \times P_i \longrightarrow P_o(dBm) = G_P(dB) + P_i(dBm)$$

射频、模拟&数字集成电路的区别

- 从关注的信号来看：电压/电流；波；0&1；
- 从技术参数来看：增益/带宽；S参数/功率；规模/处理速度
- 从频率来看
- 从收发机通道来看其位置
- 从设计方法来看

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	$Z_{in} \to \infty$ $Z_{out} \to 0$	$Z_{in} \to 50\Omega$ $Z_{out} \to 50\Omega$
信号	电压和电流 peak, p-p, rms	功率 (dBm) 增益 (dBV)
噪声	$nV/\sqrt{Hz}$	噪声系数 NF
非线性	谐波失真，交调， 限幅	三阶交调点 IP3 1-dB 压缩点

射频集成电路工艺选择

- SiGe工艺：
  - 极低的噪声性能，高截止频率，低生产成本。SiGe器件用于无线手机等，集电源功率、性能、集成度和低成本于一体。
- GaAs工艺：
  - 高击穿电压，高截止频率，半绝缘衬底，高品质电感和电容。多应用于功率放大器设计，比硅基CMOS工艺成本高很多。
  - MESFET/HEMT(高速电子迁移率晶体管)/PHEMT（界面应变式高甸子迁移电晶体）/HBT（异质结双极晶体管）
- RF-SOI工艺：
  - 无源器件品质因数高，噪声系数低，损耗低，可集成逻辑电路，具备后栅偏压可调。
- Bulk-CMOS工艺：
  - 易与数字电路集成，价格便宜，集成度高，但仍然存在设计难题：如噪声性能较差，输出功率低等。目前在各通信电路中都有广泛的应用。

The End !