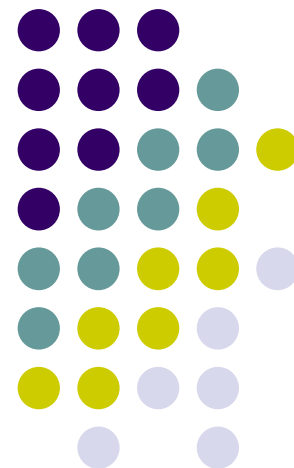


通信电子线路

东南大学信息科学与工程学院
毫米波国家重点实验室
(无线谷3号楼3407)

田 玲

2020年9月



本实验室专业基础介绍



研究领域和软件、硬件条件

- 通信系统研究（射频、基带处理硬件）
- 计算电磁学，新型材料（隐身衣，人造黑洞，石墨烯）
- 集成电路（MMIC）设计
- 实验室条件



实验室条件



毫米波国家重点实验室是我国电磁场与微波技术领域唯一的国家重点实验室。拥有一流的软硬件开发环境。毫米波国家重点实验室现有**51**位教师，包括中国科学院院士**1**位、加拿大两院院士**1**位、教育部长江学者特聘教授**3**名、国家杰出青年基金获得者**4**名。国家先后投资**5000**多万元用于购买仪器设备。拥有覆盖从**10MHz**到**500GHz**的矢量网络分析仪、频谱分析仪、数字频率计数器等，以及噪声系数测试仪(**HP8970B**)、数字信号发生器(**E4433B**、**HP83620A**)、动态信号分析仪(**HP3561A**)等全套测试仪器，拥有测试天线用的微波暗室及其相应的仪器设备和直到**40GHz**微波毫米波芯片测试系统，拥有**110GHz-1.1THz**的准光测量系统，拥有先进的正版电磁场与微波系统**EDA**软件、集成电路与系统仿真设计软件(**Cadence**、**Synopsis**、**CST**、**ADS**、**HFSS**、**MW Office**、**IE3D**、**EMPIRE**、**FAUSTUS**、**GEMS**)以及大型并行计算机。这些测量仪器和设计软件可为完成本项目提供保障。



软件学院



- 所学课程：程序设计基础及语言，面向对象程序设计（**C++**、**Java** 语言），计算机硬件基础，离散数学，数据结构，操作系统原理及应用，计算机网络及应用，编译程序构造，软件工程导论，数据库原理及应用，软件系统设计与体系结构，软件项目管理与实践。
- 大学物理（电磁学？），**电路基础？电子线路（模电、数电）？**



课程内容



- 现代通信电子线路简介
- 通信系统（无线收发信机）
- 无源器件（滤波器、功分器、耦合器、天线）
- 有源器件（放大器、混频器、频率合成器、调制/解调器）
- 通信系统EDA仿真



培养目标



- 通过本课程的学习，应掌握现代通信系统的电路原理和通信电路的基本知识。
- 了解和熟悉通信系统的组成电路，通信电路原理和应用方法，掌握通信电路技术和电路设计。
- 本课程主要以介绍通信电路基本概念和相关技术为主。



第一章 绪 论



在人类历史发展中，信息经历了五次重大变革：

- 语言的产生
- 文字的产生
- 印刷术的发明
- 电话、电报的发明
- 计算机与通信技术的结合





通信发展简史

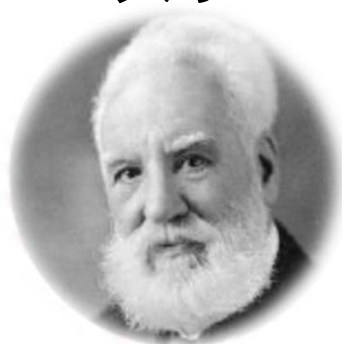
- 古代通信
原始手段：烽火、旗语
- 近、现代通信
Maxwell理论，电报、电话、有线通信、光纤通信
- 当代通信
移动通信和互联网通信



通信通信发展历程



贝尔



赫兹



马可尼



电报的发明
开创通信新纪元

1837

1876

电话的发明
通信方式的进步

电磁场理论的
奠基人

1864

实验验证电磁波
的客观存在

1887

实现了相距2英里的
无线电通信

1895

1901

完成了横渡大西洋的
无线电通信



莫尔斯



麦克斯韦



马可尼





福雷斯特



肖克利



发明电子二极管
进入无线电电子学时代

1904

1906
发明电子三极管
重要的里程碑

无线电法案
规定无线电频段

1912

1948
发明晶体三极管
第二个重要的里程碑

集成电路出现
第三个重要的里程碑

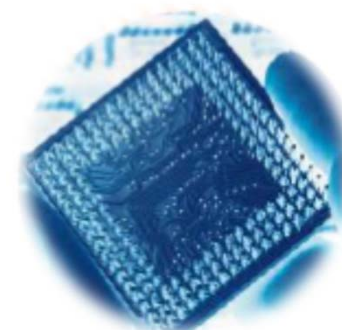
20世纪
60年代



弗来明



美国国会



集成电路



现代通信技术特点



- 通信数字化
- 通信容量大
- 通信网络系统化

现代通信形成了由各种通信方式组成的网络系统。包括局部地区网、分布式网、远程网、分组交换网、综合业务数字网等。

- 通信计算机化

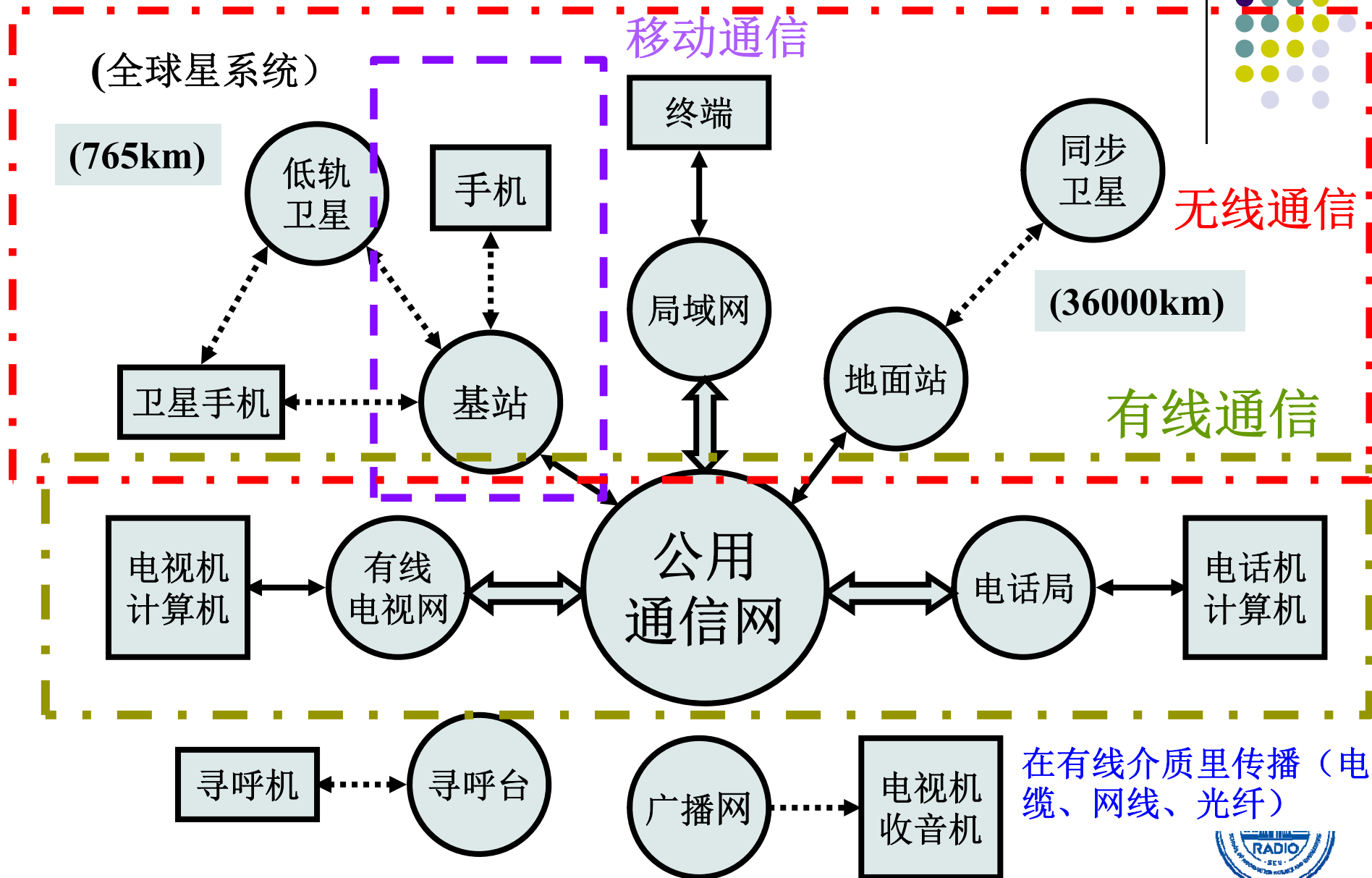
通信技术与计算机技术的结合使通信与信息处理融为一体。



: GSM、WCDMA、cdma2000、TD-SCDMA、LTE、MIMO、FDMA、TDMA、SDMA、3gpp、WiMax、IP



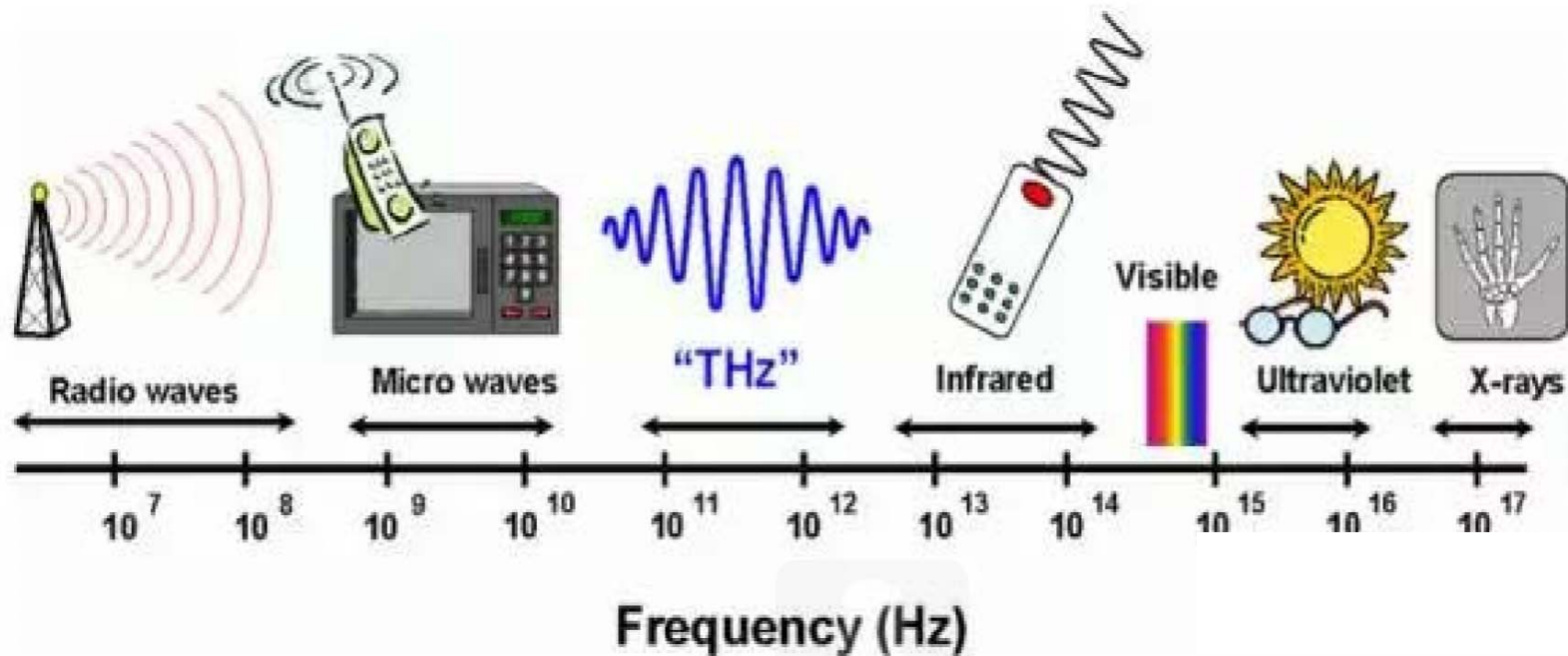
通信系统组成的示意图



通信电子线路频段划分

- 音频范围(AF) $f < 1\text{MHz}$
- 射频范围(RF) $f < 3\text{GHz}$
- 微波范围 $f < 40\text{GHz}$
- 毫米波范围 $f > 40\text{GHz}$

$\lambda = c * T = c / f$ 其中, c 是光速, $3 \times 10^8 \text{m/s}$, f 的单位是 Hz , 波长的单位是 m 。



常用频段代号



波段代号	标称波长 (cm)	频率范围 (GHz)	波长范围 (cm)
L	22	1—2	30—15
S	10	2—4	15—7.5
C	5	4—8	7.5—3.75
X	3	8—12	3.75—2.5
Ku	2	12—18	2.5—1.67
K	1.25	18—27	1.67—1.11
Ka	0.8	27—40	1.11—0.75
U	0.6	40—60	0.75—0.5
V	0.4	60—80	0.5—0.375
W	0.3	80—100	0.375—0.3



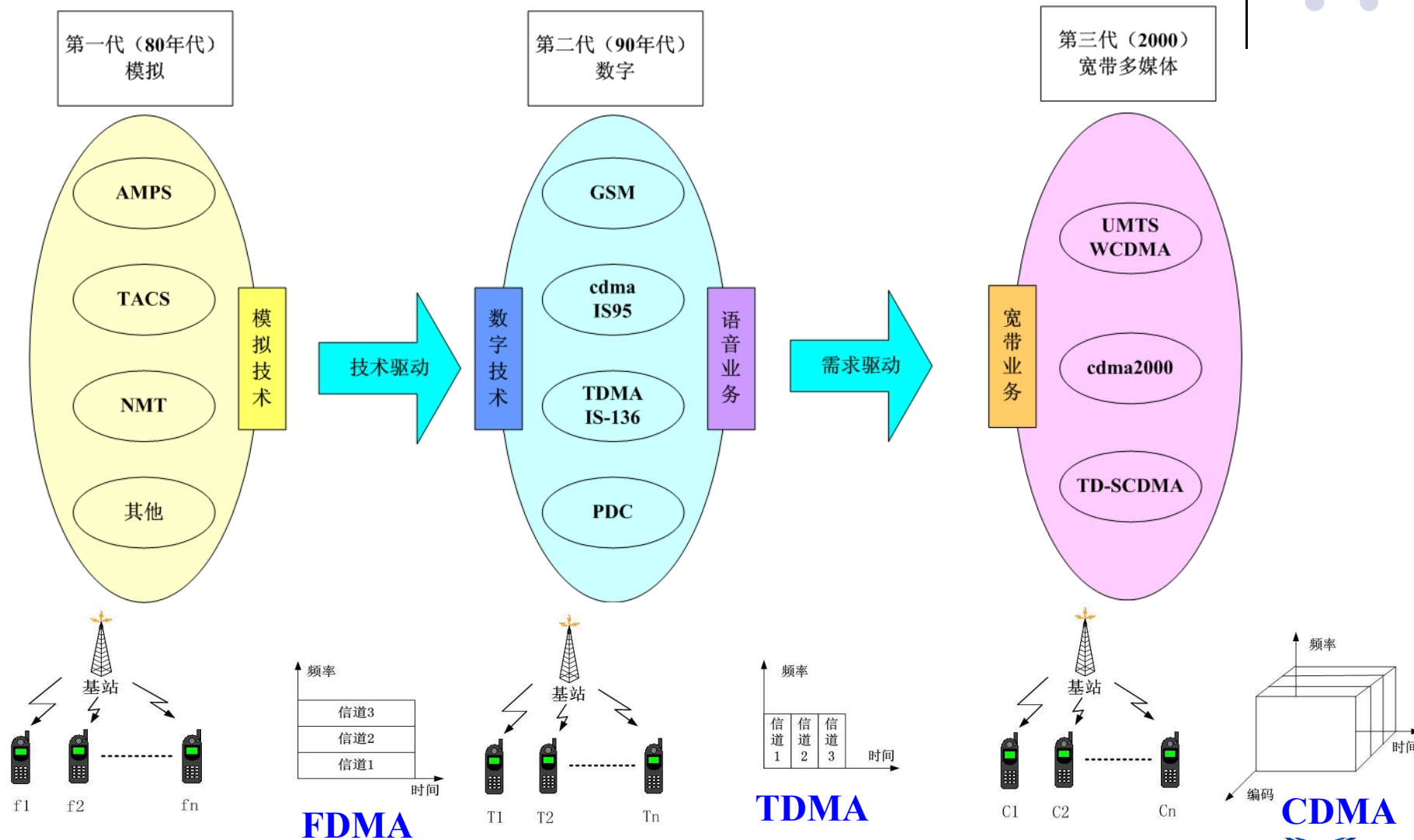
移动通信系统



- **1G**: 模拟制式, 在公众应用领域已完全被淘汰。
- **2G**: **GSM**、**GPRS**、**EDGE**和**CDMA-1X**。
- **3G**: **2009**年工信部正式发放了**3G**牌照。
 - 中国移动: **TD-SCDMA**
 - 中国联通: **WCDMA**
 - 中国电信: **CDMA2000**
- **4G**: **TDD-LTE**、**FDD-LTE**
- **5G**: **Massive MIMO**, 毫米波



移动通信技术的演进



4G通信技术(LTE: Long Term Evolution)



静态传输速率达到**1Gbps**，用户在高速移动状态下可以达到**100Mbps**。

- **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)**

正交频分多址

- **MIMO(Multi-Input Multi-Output)** 多输入多输出

标准

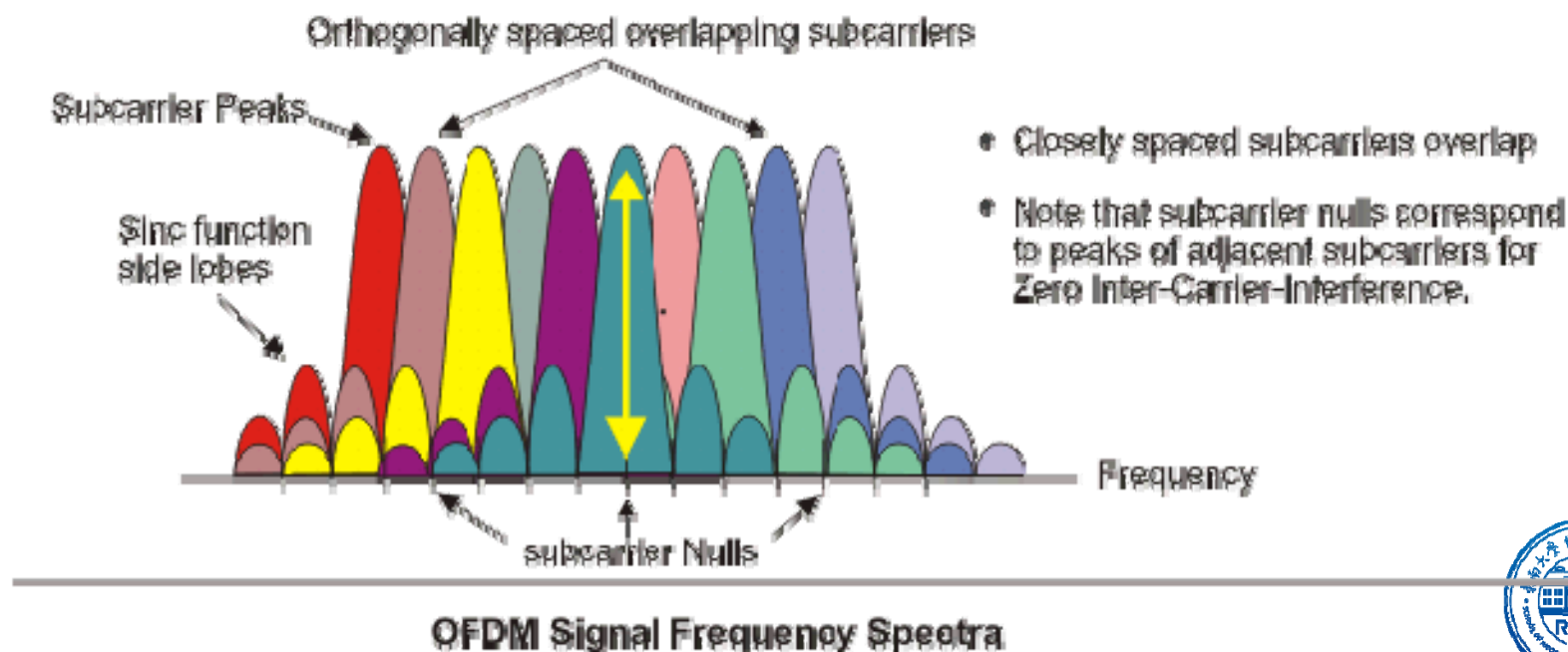
- **LTE-Advanced**
- **LTE-FDD**
- **LTE-TDD**



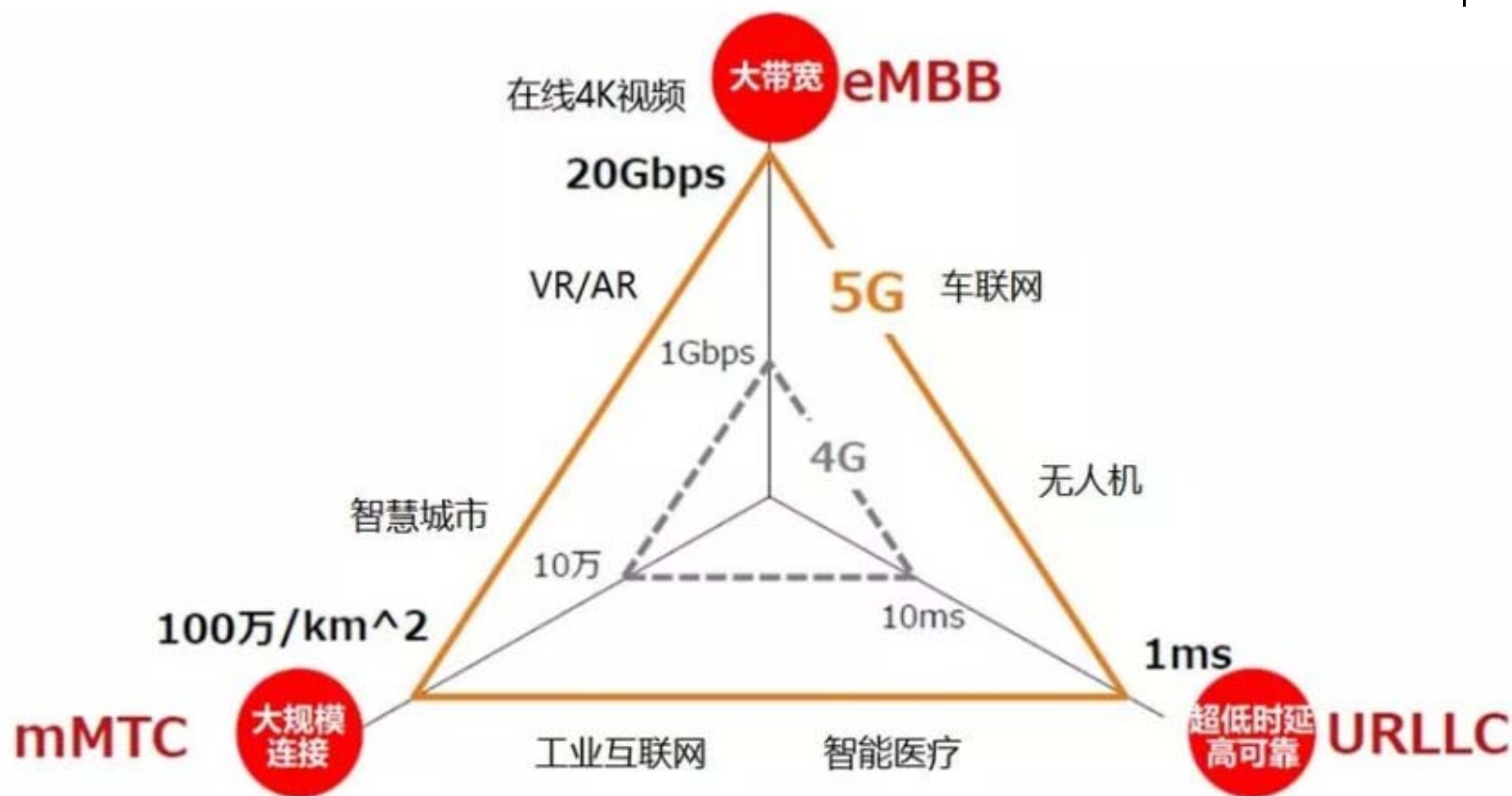
OFDM



OFDM 系统每个子载波之间具有**正交性**，子载波彼此之间不会产生干扰，且**频谱可以相互重叠**；传统频分复用（FDM）系统不同载波之间频谱没有重叠，故 OFDM 系统频谱利用率高。



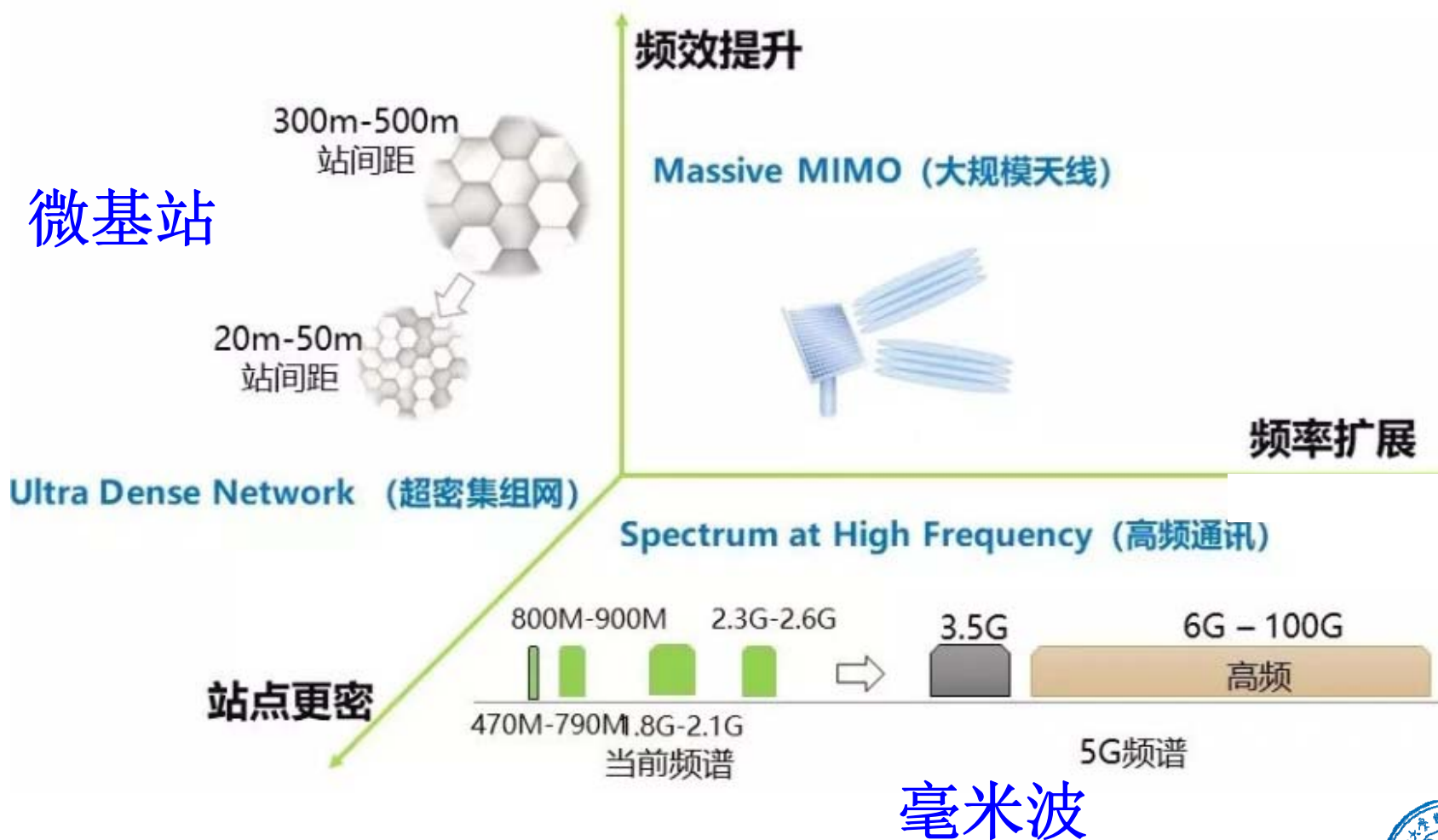
5G的技术特点及应用



王喜文 “5G为人工智能与智能制造赋能”



5G的技术突破



王喜文 “5G为人工智能与智能制造赋能”



5G演示系统现状



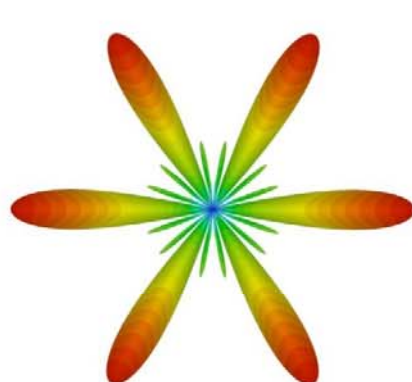
Our Massive MIMO antenna array at 3.7GHz



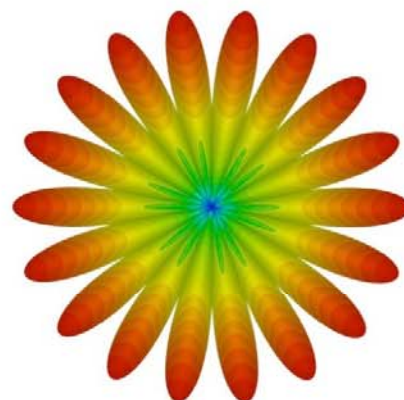
Top view of the prototype



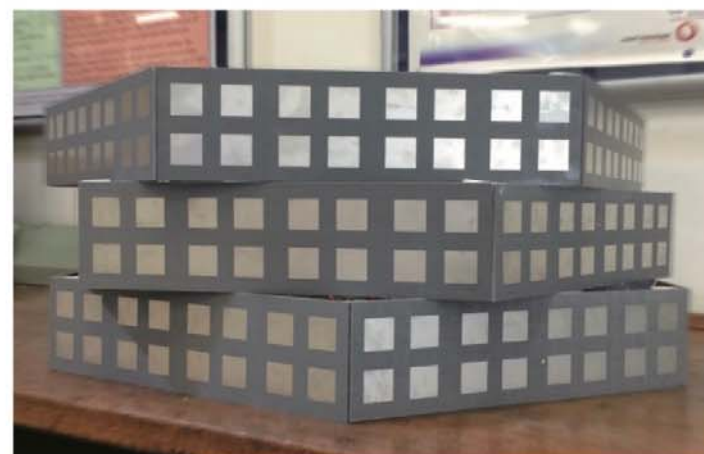
Bottom view of the prototype



one hexagon



three hexagons stacked



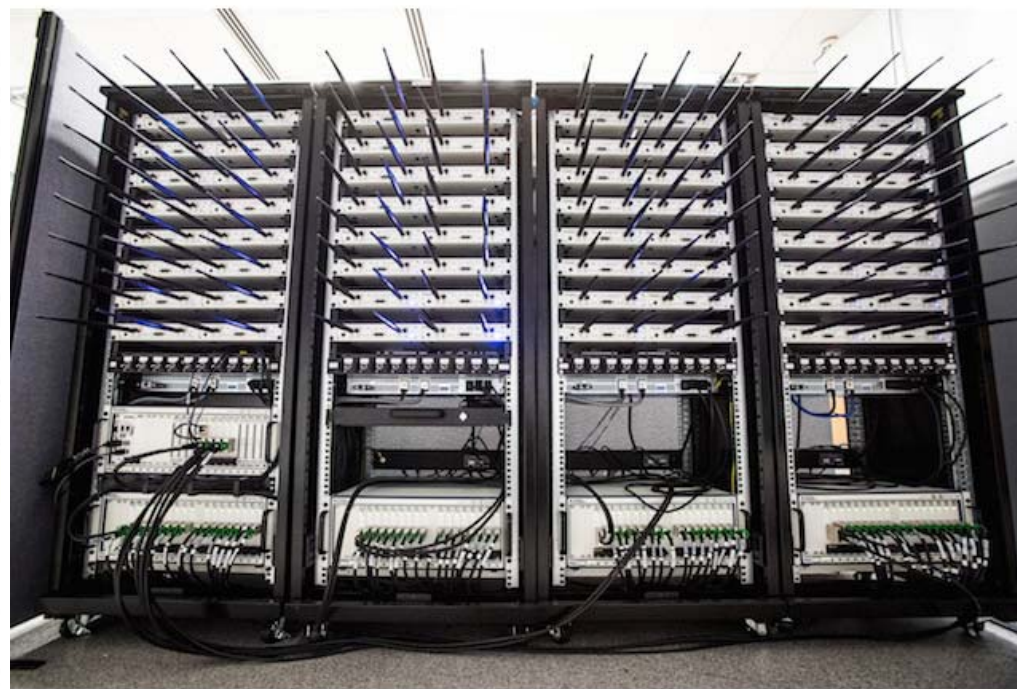
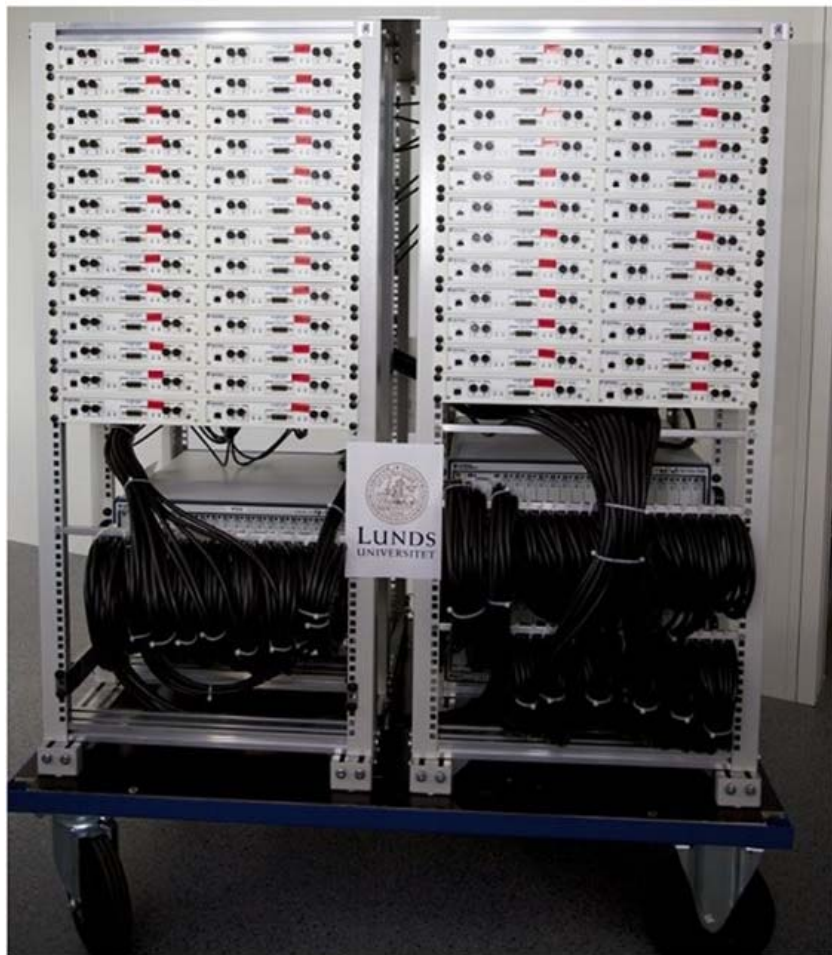
Y. Gao, R. Ma, Y. Wang, Q. Zhang, and C. Parini, "Stacked Patch Antenna with Dual Polarization and Low Mutual Coupling for Massive MIMO," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 64, no. 10, pp. 4544-4549, Oct. 2016.

(1st most frequently downloaded paper in Dec. 2016)

*This use of this work is restricted solely for academic purposes. The author of this work owns the copyright and no reproduction in any form is permitted without written permission by the author.



5G演示系统现状



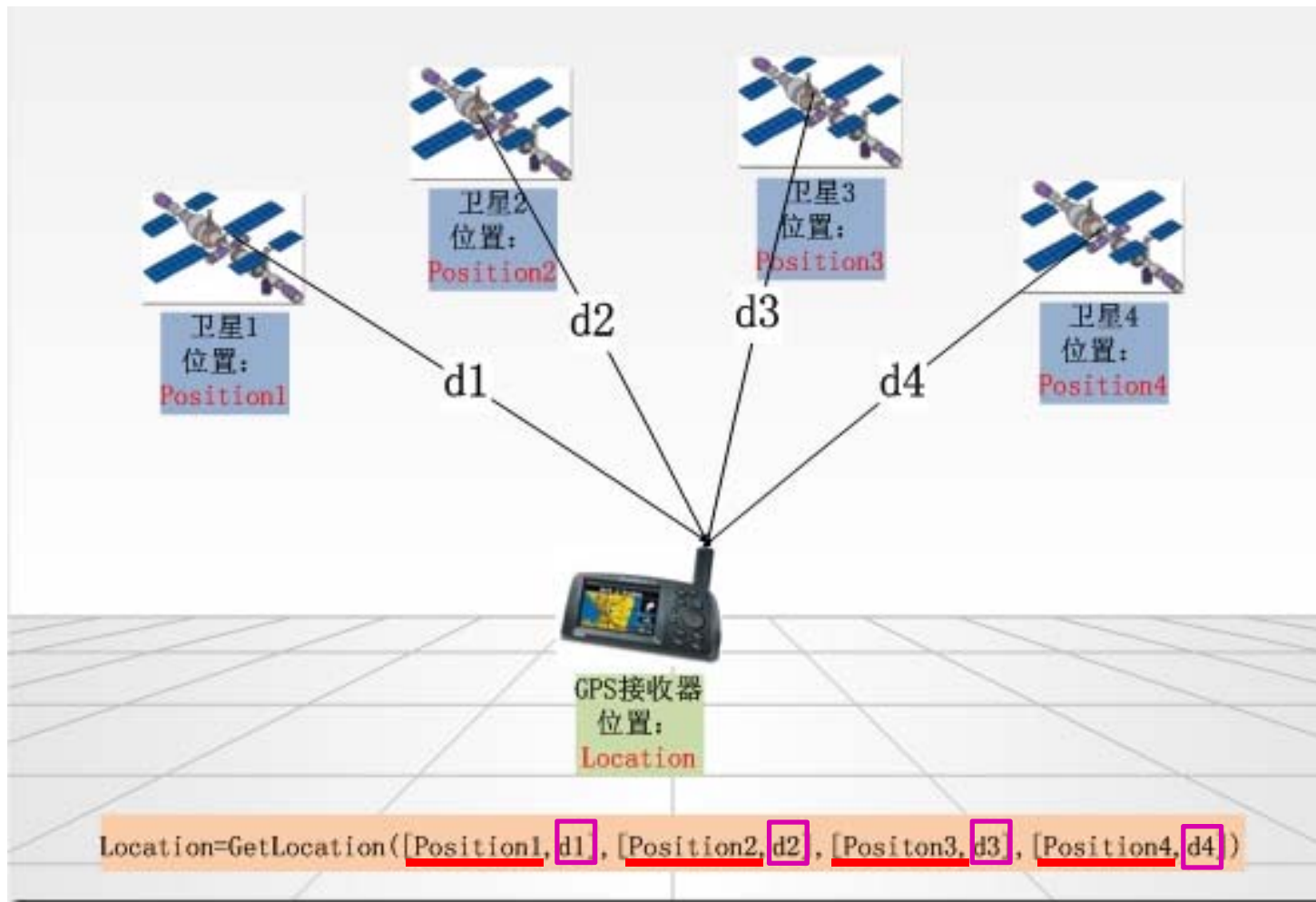
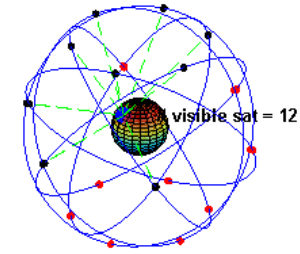
其它无线通信技术



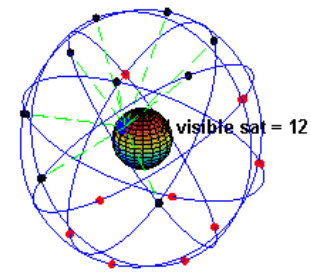
- **WLAN: Wireless Local Area Nets**（无线局域网）
- **RFID: Radio Frequency Identification**
（非接触识别系统）
- 定位系统：北斗、**GPS**、伽利略、**GLONASS**、伽利略
- 卫星通信：低轨、中轨、同步.....
- **NB-IoT、UWB、ZigBee.....**



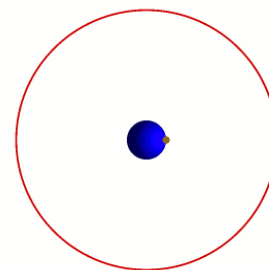
定位系统——GPS (Globe Position System)



定位系统——北斗导航定位系统



卫星通信系统简介 (空间互联网)



卫星通信简是无线电通信站间利用卫星作为中继而进行的通信。卫星通信系统由卫星和地球站两部分组成。

卫星通信的优点：通信距离远（最远可达**13000**公里）；不受两点任何复杂地理条件限制；不受两点任何自然灾害和人为事件影响（汶川地震）；通信容量大，适于多业务传输；安全可靠。

卫星通信的缺点：**传输时延大**（**500ms~800ms**延时）；高纬度难于实现卫星通信；为避免各卫星通信系统之间的干扰，同步轨道的星位是有限度的，不能无限增加；太空中的日凌现象和星食现象会中断和影响卫星通信；星发射的成功率为**80%**，卫星的寿命为几年到十几年；发展卫星通信需要长远规划和承担发射失败的风险。

分类：固定卫星通信；移动卫星通信

静止地球轨道（**GEO, 35767km**）、低地球轨道（**LEO, 160~2000km**）、中地球轨道（**MEO, 2000~35767km**）；





NB-IoT是物联网领域一个新兴的技术，支持低功耗设备在广域网的蜂窝数据连接，也被叫作低功耗广域网(**LPWAN**)。

NB-IoT四大特点：一是**广覆盖**，将提供改进的室内覆盖，在同样的频段下，NB-IoT比现有的网络增益**20dB**，相当于提升了**100倍**覆盖区域的能力；二是**具备支撑海量连接的能力**，NB-IoT一个扇区能够支持**10万个**连接，支持低延时敏感度、超低的设备成本、低设备功耗和优化的网络架构；三是**更低功耗**，NB-IoT终端模块的待机时间可长达**10年**；四是**更低的模块成本**，企业预期的单个接连模块不超过**5美元**。



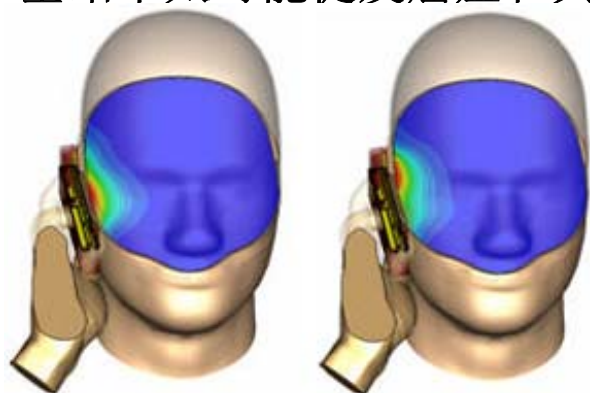
移动电话辐射对健康的危害



辐射分类：电离辐射（高频）和

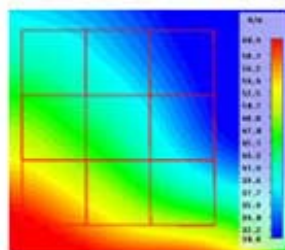
α 射线，γ 射线，β 射线，X光射线和中子射线，能打破人体化学键

基于大多数科学和医学机构的研究，世界基站不太可能促发癌症和其他身体危害产生。

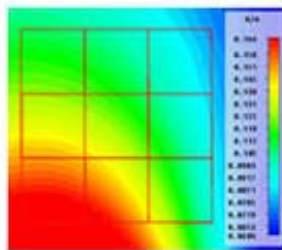


SAR 900MHz

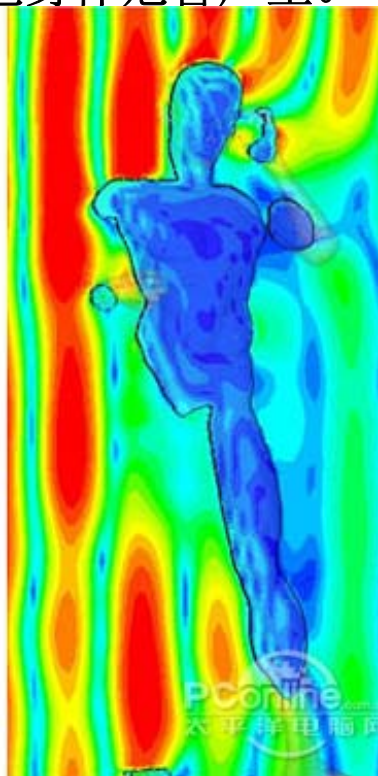
SAR 1800MHz



HAC电场



HAC磁场



手機盡量遠離身邊

- 少用手持話筒
改用藍芽或是耳機
- 少講電話
用簡訊替代
- 手機不放口袋
放手提袋或包包中

釋出大量射頻輻射時少用手機

- 手機訊號
只有一兩格時
- 在快速移動的
車輛上時
- 串流音樂、下載或
上傳大型檔案時

晚上睡覺手機可以 關機或是飛航模式

不然盡量遠離床邊

沒講電話時 將耳機聽筒拿開

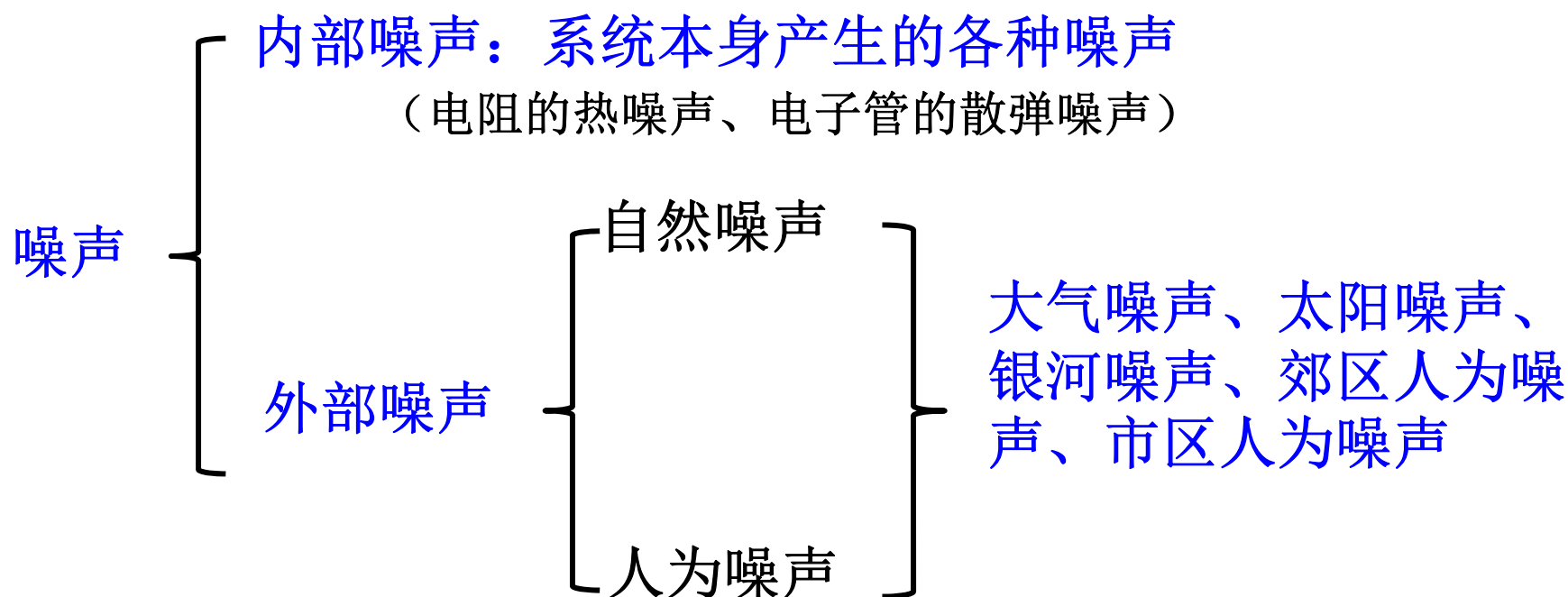
不使用宣稱可以 阻隔射頻輻射的產品

控制孩子玩手機或 是平板的時間

信道中的噪声与干扰



信道对信号的传输受限于噪声和干扰：



干扰：系统自身产生的干扰，如邻道干扰、互调干扰以及远近效应近端对远端的干扰等。



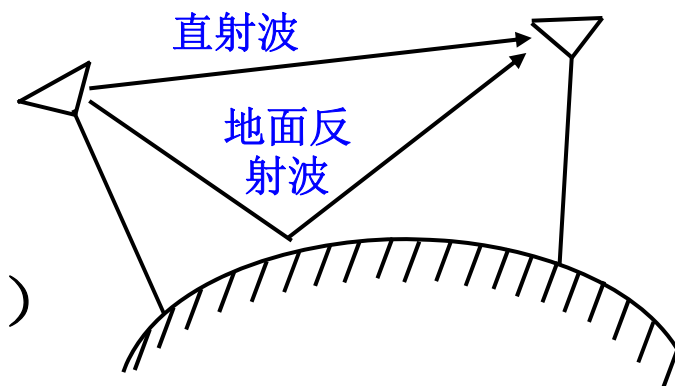
通信系统的基本特性



一、传输距离

传输距离是指信号从发送端到达接收端并能被可靠接收的最大距离。

- 发送端的信号功率。
- 信号通过信道的损耗（自由空间）



$$IL \text{ (dB)} = 32.5 + 20\log f(\text{MHz}) + 20\log d(\text{km})$$

- 信号通过信道混入各种形式的干扰和噪声。
- 接收机的接收灵敏度。





例：两通信系统的通信频率为2.4GHz，通信距离为5米，求路径损耗（IL: Insert Loss）？

$$IL=32.5+20\log f(\text{MHz})+20\log d(\text{km})$$

解： $f=2.4\text{GHz}=2400\text{MHz}$;

$d=5\text{m}=0.005\text{km}$;

$$IL=32.5+20\log 2400+20\log 0.005=54.1\text{dB}$$

$$V_2/V_1=0.00197$$

$f\uparrow \rightarrow IL\uparrow$; $d\uparrow \rightarrow IL\uparrow$



二、通信容量

通信容量是指一个信道能够同时传送独立信号的路数。



- 已调信号所占有的频带宽度。
 - 国际规定电话信号的频带是**300~3400Hz**。
 - 中波**调幅广播**（**535kHz~1605kHz**），广播电台每个已调信号占有的频带宽度是 **9kHz**。
 - 我国采用的**电视图象**信号的频带宽度是**0~8MHz**。
 - GSM 信号带宽 200kHz，cdma2000 信号带宽 1.2288MHz，WCDMA 信号带宽 3.84MHz，TD-SCDMA 带宽 1.28MHz。
 - LTE 支持灵活的信号带宽 1.4MHz、3MHz、5MHz、10MHz、15MHz、20MHz。



三、信号失真度

信号失真度指的是接收设备输出信号不同(失真)于发送端基带信号的程度。

- 信道特性不理想。
- 对信号进行处理的电路（发送与接收设备）特性不理想。

四、抗干扰能力

信号通过信道时，总要混入各种形式的干扰和噪声，使接收机输出信号的质量下降。

- 提高通信系统的抗干扰能力。
- 选用高质量的调制和解调电路。



移动通信中信道的问题



➤ 阴影效应—阳光不能普照

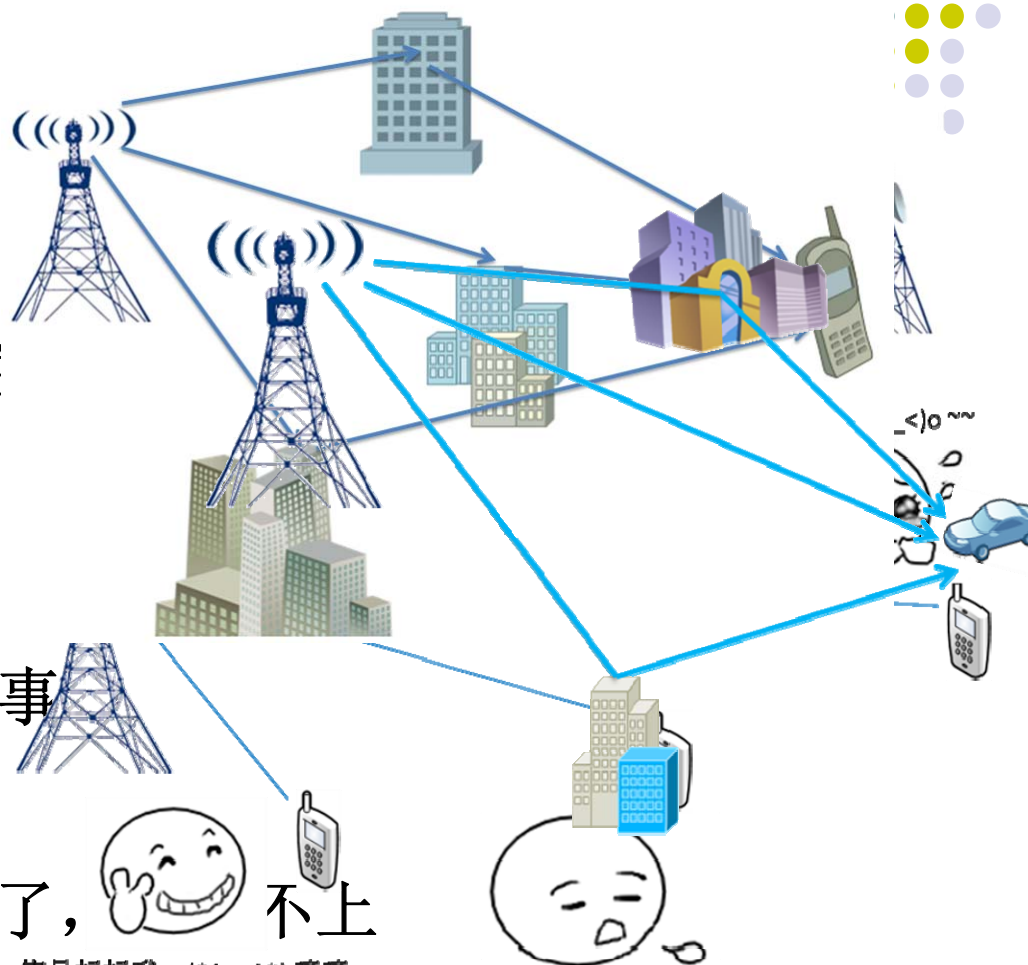
➤ CDMA中离基站距离较近的到的基站信号就比较强。

➤ 多径效应—路太多也非好事

➤ 多普勒效应—你跑的太快了，不上

信号好好哦，(*^__^*) 嘻嘻.....

信号一般，咕~~~(͡° ͜ʖ ͡°)b.....



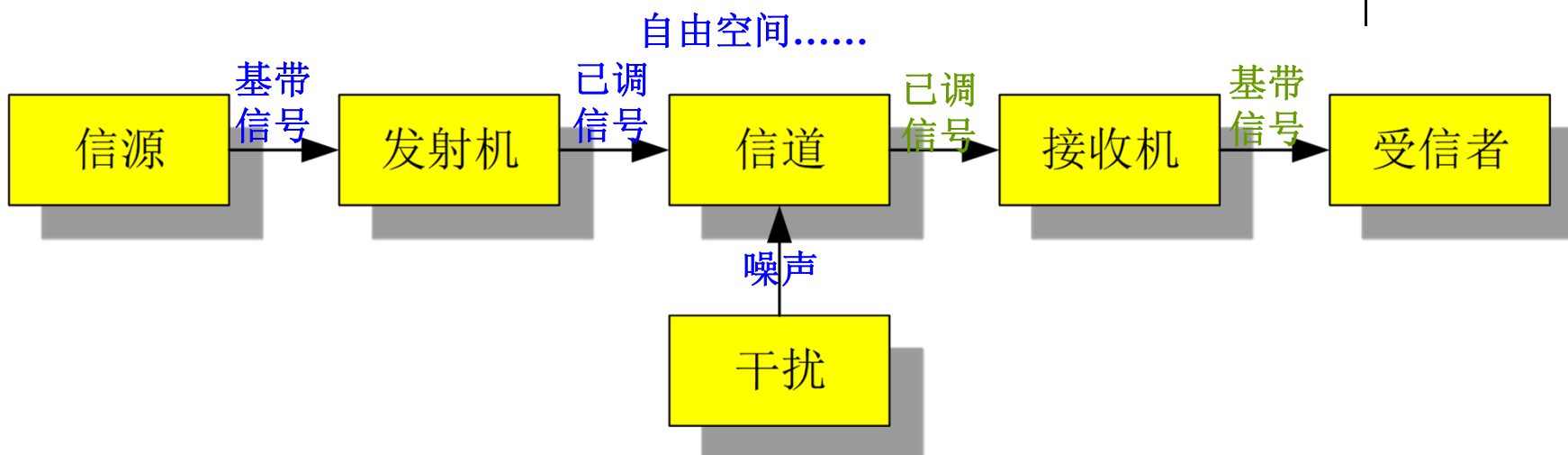
移动通信中的

东南大学 信息科学与工程学院
SCHOOL OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING

通信系统模型



- Shannon通信系统模型



- 上图为**1948年Shannon**最初提出信息论时所采用的模型，该模型不仅适用于各类通信系统，还适用于一切有信息传递和变换的过程。
- Shannon**的“通信的数学理论”一文奠定了数字通信的基础。



1.SWF



2.SWF



通信系统的分类



- 按照传输信号的类型：模拟通信和数字通信；
- 按照调制方式分类：调幅、调频、调相；
- 按工作频段分类：长波通信、中波通信、短波通信、微波通信等；
- 按照通信方式来分类：全双工、半双工、单工；
- 按照通信内容分类：语音通信、图像通信、数据通信、多媒体通信等；



模拟通信与数字通信

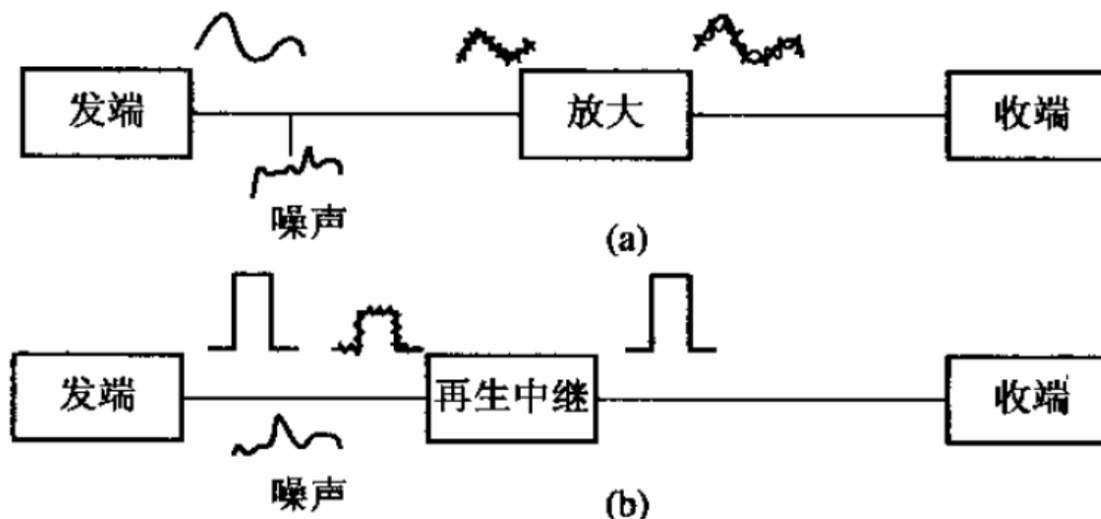


- 按信道中传输的信号类型可以把通信系统分为两类：模拟通信系统与数字通信系统。
- 模拟信号的特点是变量是连续的。模拟通信系统对模拟信号直接变换和传递。
- 模拟信号传输的最大缺点就是信号传输的质量会因传输距离的增加而下降。
- 与模拟信号相比，数字信号在时间和幅度方向上都是离散的。从原理上说，数字信号可以用任何进制系统表示。但在实际上通常采用二进制(**bit**)，这是由于其简便和技术可行性决定的。
- 数字通信能够在现代通信中越来越起到主导作用是因为在传输系统中信号可以被多次再生从而实现无差错传递。



数字通信的优点

- 抗干扰能力强，信号可再生。
- 传输差错可以控制，差错编码。
- 采用**DSP**技术易于处理。
- 信息易于加密。
- 数字通信可综合传递各种消息。



数字通信的缺点



- 数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的系统频带而换得的。
- 例如：对于一路模拟电话通常只占据**4kHz**带宽，而一路传输质量相同的数字电话如**PCM**要占据**64kHz**带宽。



通信电路（模拟）和数字电路的差别



	模拟电路	数字电路
阻抗	低（典型 50 欧）	高（理想情况为无穷大）
阻抗匹配	很重要	一般不考虑
电流	大（ mA ）	小（ uA ）
传输类型	功率（ W ， dBm ）	状态（电压）



通信电子线路简介



- 集总电路（**Lumped circuit**）：在一般的电路分析中，电路的所有参数，如阻抗、容抗、感抗都集中于空间的各个点上、各个元件上，各点之间的信号是瞬间传递的，这种理想化的电路模型称为集总电路。

a) 集总元件的基本条件 $<0.1\lambda_0$

b) 集总元件基本表述方法

电阻 $R=R_0$

电感 $X_L=\omega L$

电容 $X_C=1/(\omega C)$

$$\lambda=c*T=c/f$$

$$f=10GHz, \lambda=0.03m=3cm$$

$$f=30GHz, \lambda=0.01m=1cm$$

c) 系统分析方法？ 基尔霍夫定律



通信电子线路简介

- 元件的高频性能
 - a) 技术变化趋势：从集总元件到分布元件。
 - b) 分析方法：路的理论到场理论。
- 重要的分布效应

1) 趋肤效应:

当频率升高，电流趋向于导体表面的现象即趋肤效应。



2) 寄生效应:

a) 电阻:



金属膜电阻



碳膜电阻



线绕电阻



水泥电阻



贴片电阻



压敏电阻



热敏电阻



湿敏电阻



光敏电阻



- 一个**500Ω**引线电阻实例的等效电阻特性*

引线是长**2.5cm**的 **AWG26**线(或直径**16mil**, 或**0.4064mm**),
寄生电容**C1=5pF**, 寄生电感

$$\begin{aligned}(\omega L)/R_{DC} &= a/(2\delta) \Rightarrow L = R_{DC} \frac{a}{2\omega} \sqrt{\pi f \mu_0 \sigma_{cu}} \\&= \frac{2l}{\sigma \pi a^2} \frac{a}{4\pi f} \sqrt{\pi f \mu_0 \sigma_{cu}} \\&= \frac{2l}{4\pi a} \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi \sigma_{cu} f}} = \frac{1.54}{\sqrt{f}} (\mu H)\end{aligned}$$

$$Z = j\omega L + \frac{1}{j\omega C + 1/R}$$

*——《射频电路设计》，pp.11





- 特性:
 - $< 50\text{MHz}$, 理想电阻特性
 - $50\text{MHz} \sim 20\text{GHz}$, 电容特性
 - $> 20\text{GHz}$, 电感特性

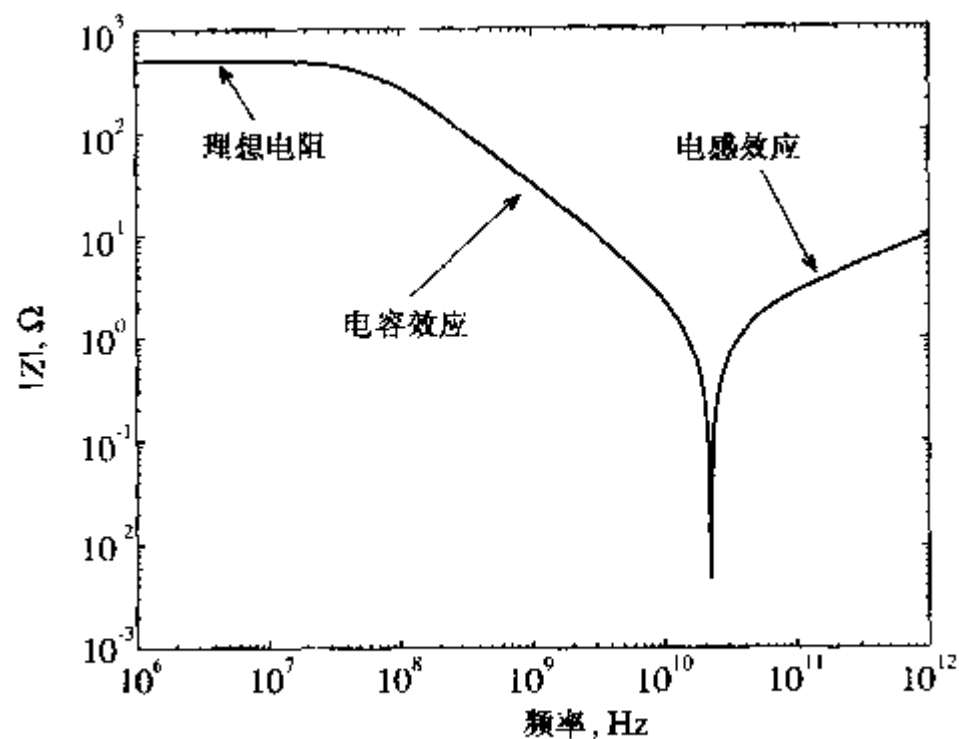


图 1.10 一个 $500\ \Omega$ 金属膜电阻的阻抗的绝对值与频率的关系



b) 电容:

- 封装分为插装和表贴
- 材质指的是电解质材质



金属膜电容



云母电容



独石电容



瓷片电容



钽电解电容

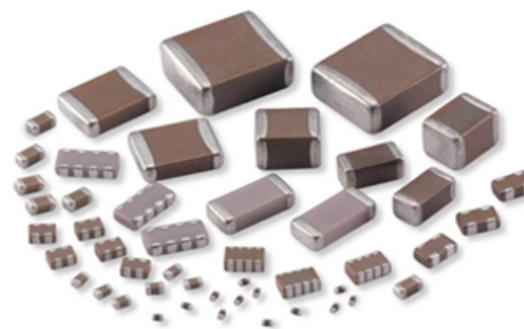
用!



液态
铝电解电容



聚合物
铝电解电容



片状多层
陶瓷电容

在高频时，电容平板之间的介质是有损耗的，介质损耗电阻





- 一个47pF电容器的特性*

引线长度1.25cmAWG26铜线，介质为氧化铝，
损耗正切0.01%.

- 特性

寄生电感

$$L = \frac{771}{\sqrt{f}} (nH)$$

引线串联电阻

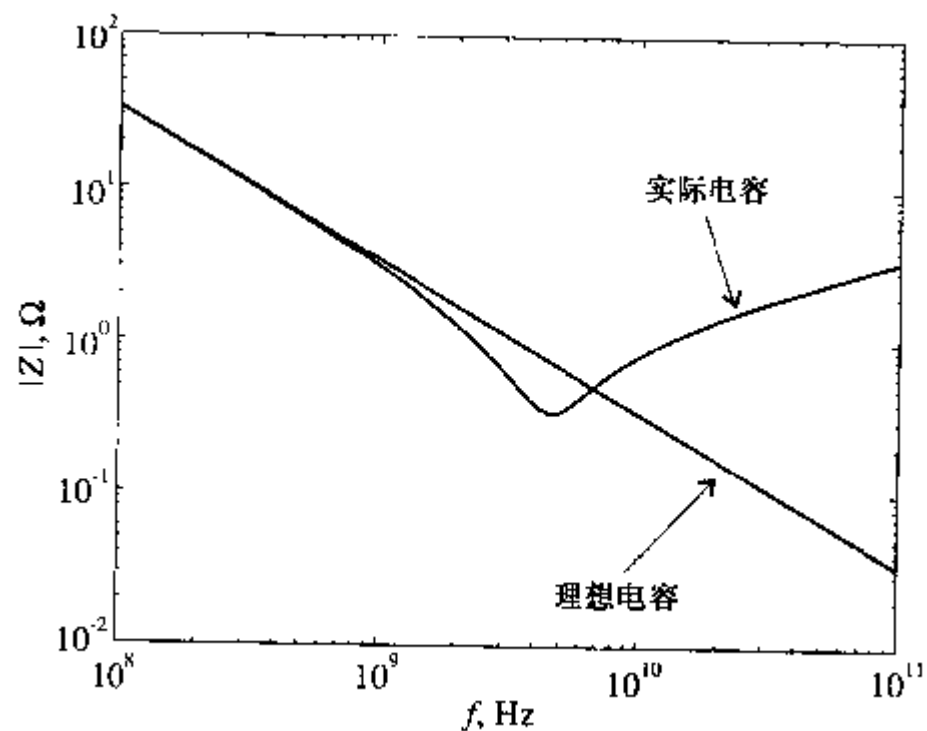
$$R = 4.8\sqrt{f} (\mu\Omega)$$

并联漏泄电阻

$$R = \frac{33.9 \times 10^6}{f} (M\Omega)$$

*——《射频电路设计》，pp.13



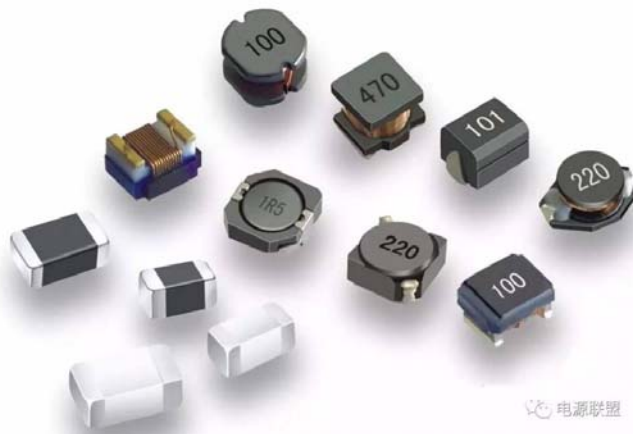
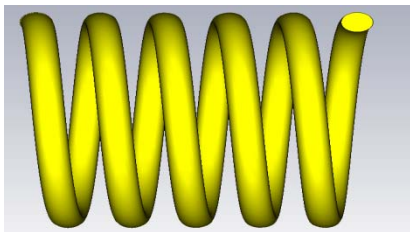


在约5GHz有一谐振点，小于谐振频率为电容特性，大于此频率为电感特性。



c) 电感

电感主要通直流，阻交流，在电路可用于滤波、振荡、延迟、陷波等作用。



空芯电感

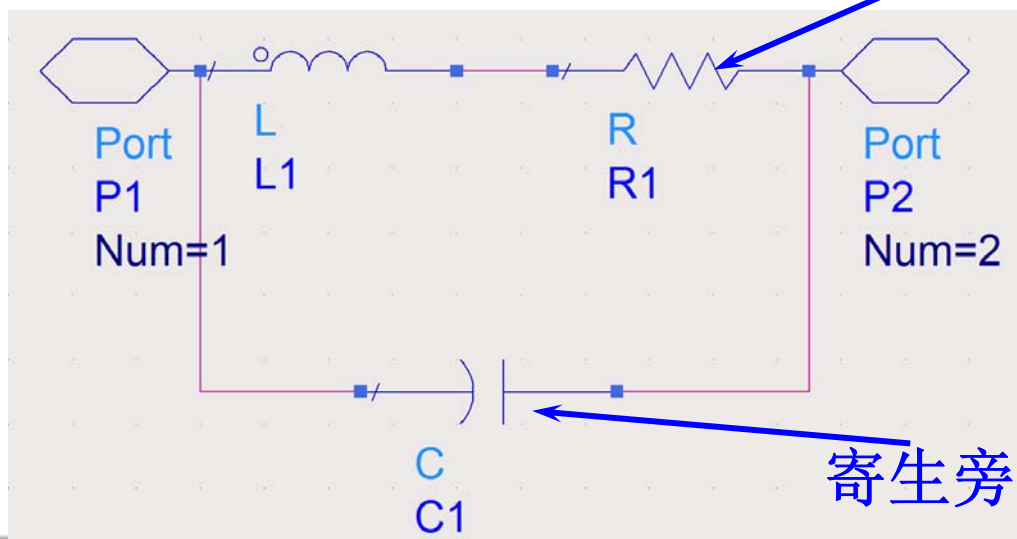


铁芯电感



磁芯电感

- 由导线绕制而成
- 符号 (L)
- 单位: **H** (亨利)、mH (毫亨)、 μH (微亨)
 $1\text{H}=10^3\text{mH}$, $1\text{mH}=10^3\mu\text{H}$





■ 一个电感实例 *

线圈由AWG36铜线在0.1英寸空气芯上绕3.5匝，长0.05英寸。

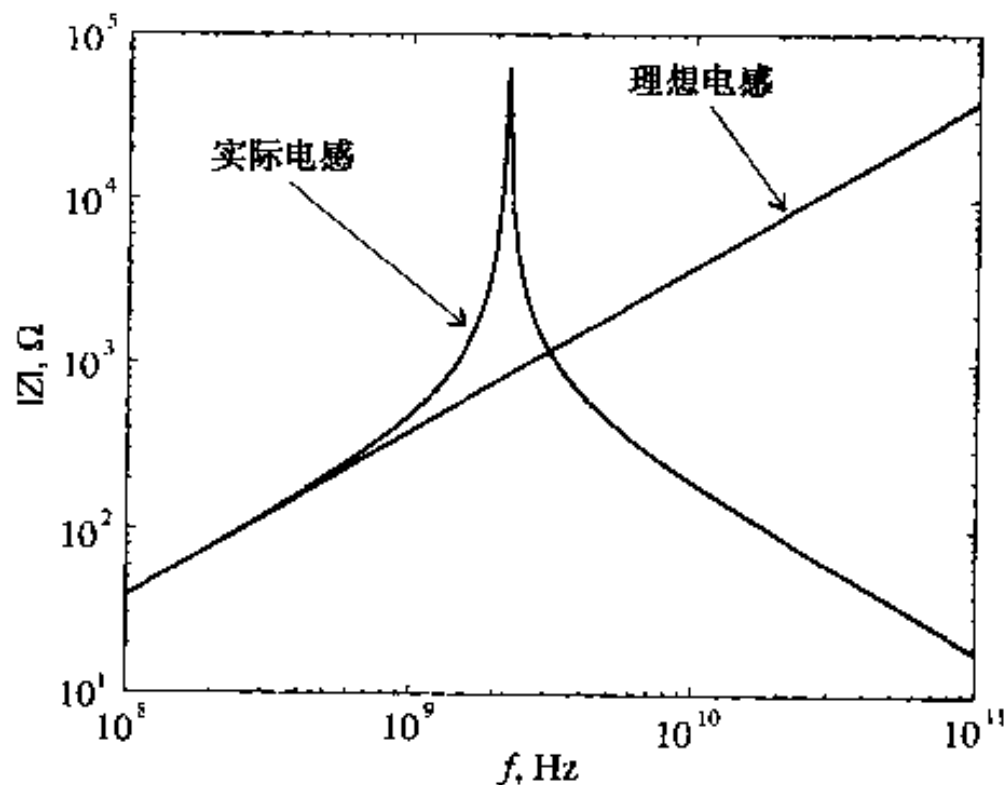
由空气螺旋电感公式得：
$$L = \frac{\pi r^2 \mu_0 N^2}{l} = 61.4(nH)$$

将寄生电容近似为平板电容得：
$$C = 0.087(pF)$$

导线电阻：
$$R = 0.034(\Omega)$$

*——《射频电路设计》，pp.15

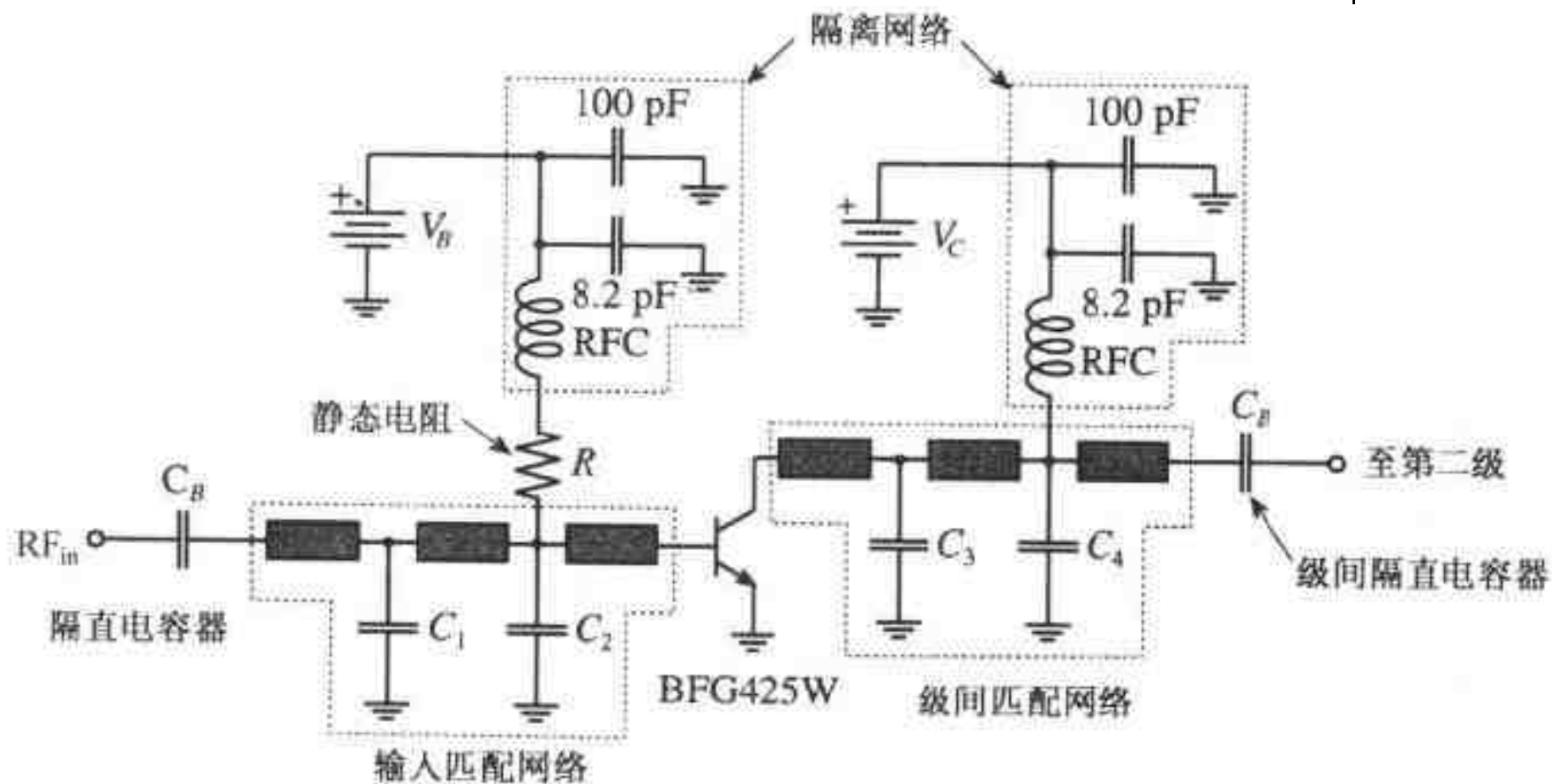




在约2GHz处产生谐振，小于谐振频率为电感特性，大于谐振频率，寄生电容影响成为主要的，阻抗降低，呈现电容特性。



功率放大器原理图



功率放大器的版图

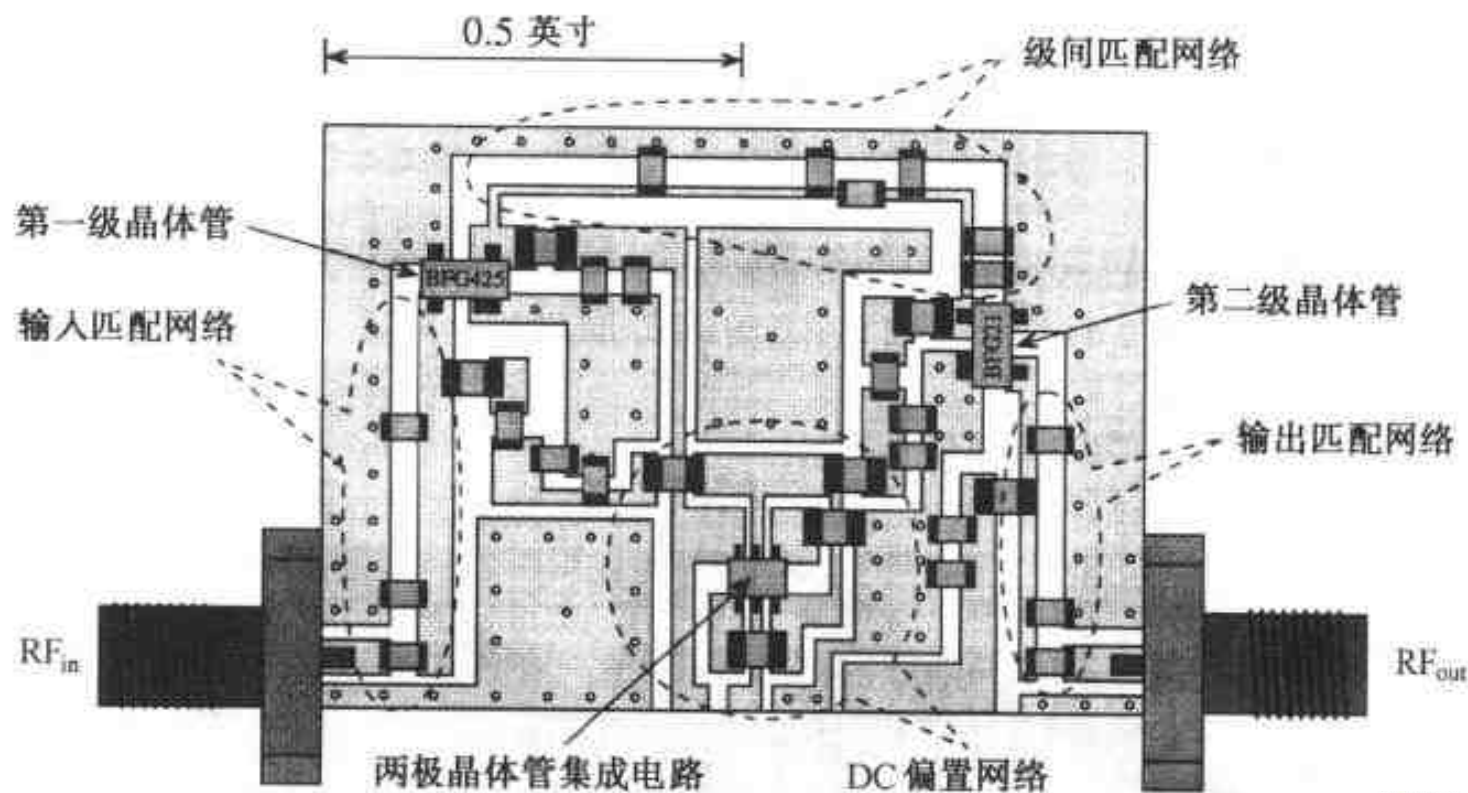


图 1.2(b) 功率放大器印刷电路板的布局



通信电子线路（高频电子线路）特点



➤ 频率高

能容纳的信息量大，绝对带宽宽；器件高低频之间的差异；趋肤效应；辐射效应（天线）；时延特性

➤ 似光性

反射（成像），直线传播（方向性好，体积小的天线）

➤ 能穿透电离层

➤ 量子特性（微波炉）



通信设备的小型化与大规模集成



小型化的基本技术

- 电路小型化
 1. 易于集成（研究电路结构使其方便集成）
 2. 高密封装技术（贴片封装及多层印刷板）
- 低功耗器件（散热设计）

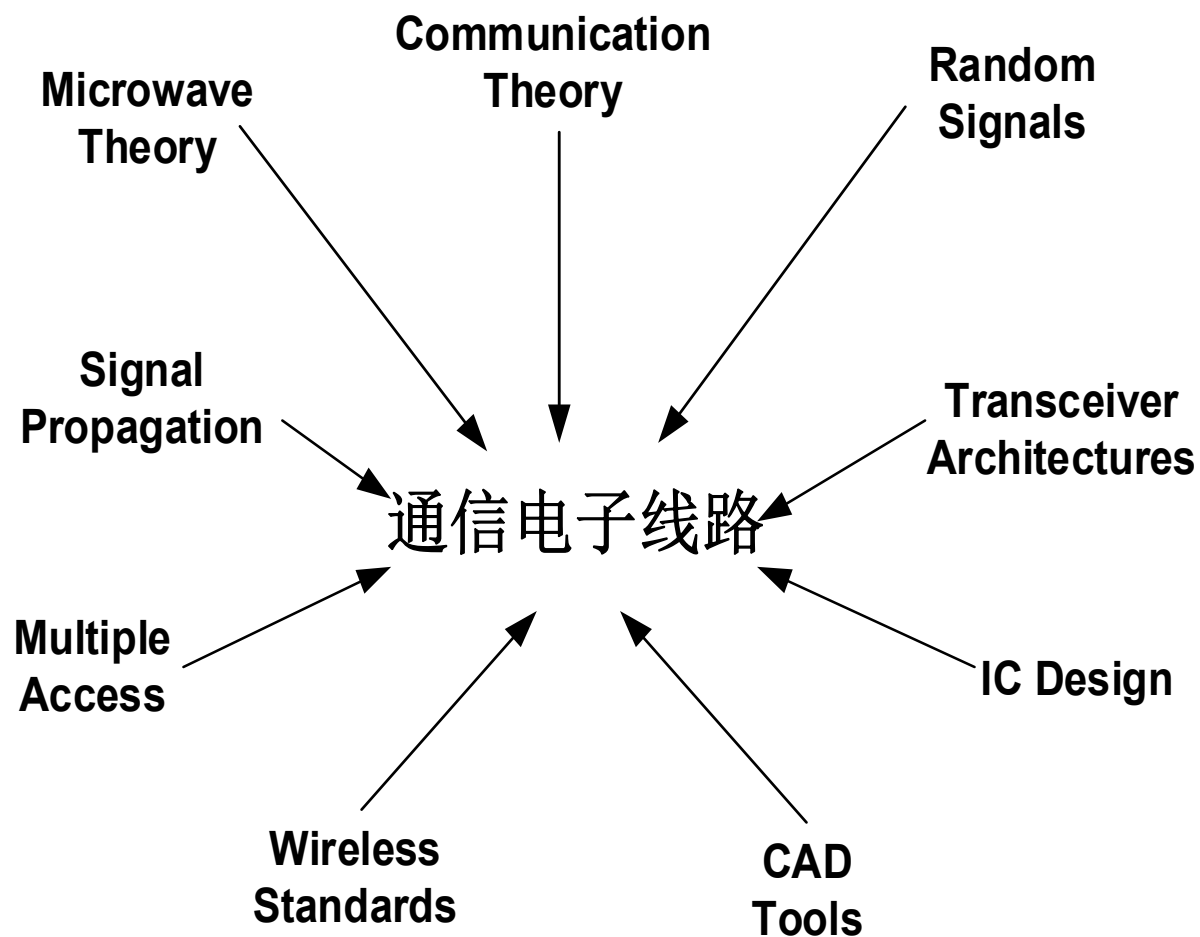


常用的测量仪器

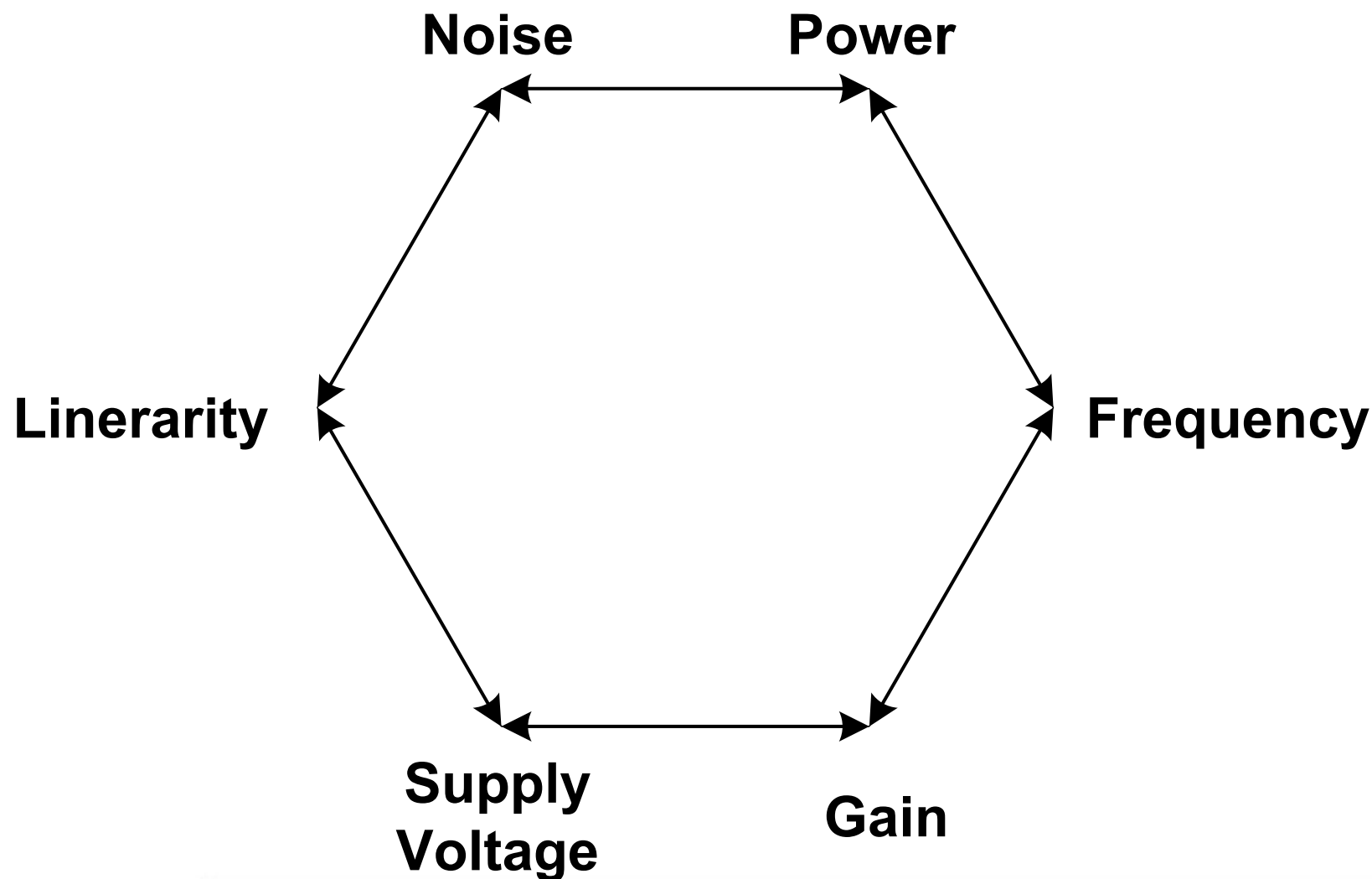
- **Vector Network Analyzers**
 - Component Characterisation – insertion loss
 - S-parameters - matching
- **Spectrum Analyzers**
 - Output Power, harmonics, spurious emission
 - Phase Noise
 - ACP
 - OBW
 - Modulation - deviation
- **Signal Generators**
 - Sensitivity (BER option needed)
 - Selectivity/blocking
 - Two-tone measurements – IP3
- **Power Meters**
 - Output Power – calibration
- **Oscilloscopes**
 - Digital signal analysis
- **Function and Arbitrary Waveform Generator**



通信电子线路所需的学科



通信电子线路设计六角形



本课程的内容



- **无源**：传输线基础、S参数等网络参数概念、阻抗变换、阻抗匹配、混合接头与耦合器、谐振器和滤波器、天线；
- **有源**：各种常用二极管、三极管、场效应管、小信号放大器、功率放大器、混频器、振荡器、衰减器、开关、功放线性化技术；
- **系统**：射频链路分析方法和射频电路性能指标；射频电路及系统EDA（以ADS为基础）和射频电路及系统测量方法。



考核方法

- 平时 10%
- 作业 10%
- 考试 80%



主要教学参考用书:

◆ 通信电子线路

顾宝良 编著, 电子工业出版社

◆ 射频电路设计—理论与应用

Reinhold Ludwig等著, 王子宇等

◆ 射频通信电路

陈邦媛编著, 科学出版社

◆ 微波工程

D.M. Pozar 著, 张肇仪等译, 电

◆ 微波固态电路设计

Inder Bahl 等著, 郑新 等译, 电

