



通信电路原理

2022年春季学期
课程安排



上课模式

- **提前三天在网络学堂发布PDF课件供同学预习**
- **线上用瞩目配合雨课堂录屏直播**
- **应急群应对紧急情况**
 - 同学可以通过应急群告知突发情况



助教讨论群

- **助教本周建群，同学在该群讨论，同学可以将问题集中到助教处，助教统一视频答疑，包括CAD答疑**
 - 讨论群不是助教一人答疑，而是所有人参与的讨论
 - 助教：叶婉婷
- **助教在网络学堂发布的CAD工具使用方法，大家可以先练练手，CAD工具是课程学习的最好帮手，是家中的实验室**
- **同学主要通过EMAIL答疑，如果觉得有必要也可申请瞩目视频答疑**
 - guolinli@tsinghua.edu.cn

根据实际授课情况，讲不完则顺延，
有可能会增加为23节

课程安排

■ 共22节*2学时=44学时的课堂讲解

- 第一章 绪论 1节
- 第二章 滤波器 3节
- 第三章 放大器 3节
- 第四章 非线性电路 3节
- 第五章 振荡器 2节
- 第六章 调制与解调 5节
- 第七章 锁相环 3节
- 第八章 频率综合器 1节
- 复习 1节



15周课程计划

- 争取在前12周将理论课讲完
 - 实验课可本学期上，也可明年上
 - 实验课相对比较独立，不上理论课的也可以选实验课
- 选实验课的请听从皇甫老师的安排



考评

- 期末考试：70分
- 作业：30分
 - 其中CAD作业10分（cadence平台做）
 - 不理解的地方仿真看看，分析仿真结果和分析结果到底差在哪里
- 额外加分
 - 自行完成一个通信系统设计和功能调试（和皇甫老师的实验不同，应自行设计、调试，皇甫老师验证）
- 总分不超过100分



学习要求

- 课堂
 - 紧跟老师的思路听课
- 作业
 - 不抄袭，独立完成作业
 - 可能处理方式：作业分数超过某个界限后，均按高分计
 - 根据考试情况决定是否修改
 - 及时交作业，随时答疑，不把问题留到期末
 - 超过两周交，按8折计分，超过四周交，按6折计分
- 讲义
 - 内容较多，融会贯通



教学参考书

■ 教材

- 董在望 主编, 《通信电路原理》, 第二版, 高等教育出版社, 2002。

■ 教参

- 1. 陈雅琴, 李国林, 《通信电路原理学习指导书》, 高等教育出版社, 2007。
- 2. 陈邦媛, 《射频通信电路》, 科学出版社, 2002。
 - Behzad Razavi, RF Electronics, Prentice Hall, 1998.
- 3. Thomas H. Lee, The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits, Cambridge University Press, 1998. (2004, 2nd Edition)



通信电路原理

第一章 绪论



绪论

- 通信系统的基本概念
- 射频通信系统中信号处理的四个基本环节
- 信号传输的基本问题
- 这门课程的具体内容



一、通信系统的基本概念

- 通信电路
 - communication circuits
- 通信communication?
 - 通信是通过某种媒质（信道）进行的**信息**传递或交换 information transfer
- 信息?
 - ...



信息 information

- 没有一个定义让所有人认同
- 维纳
 - Information is information, not matter and energy
 - 信息即信息，非物质，非能量
- 对人而言，简单地说：信息是让人为之作出反应的因素
 - 人获得信息后消除了某种不确定性，从而可以作出某种决策行为，因而人是根据信息作出决策的，信息直接影响（决定，控制）着人的行为



信息表征 representation

- 人类社会中，人们通常用某种符号或编码体系做为信息载体实现信息的交换
 - 这些载体符号包括语言、文字、图像、暗语、电码、表情、手语、旗语、...
 - 负荷了信息的符号也被称为消息message
- 通过某种媒质进行的消息传递被称为通信
 - 简而言之，通信的目的是为了实现信息交流
 - 人的行为受信息驱动，信息交流是为了扩大信息发布者影响力的



人类的原始通信方式

- 利用自身五官实现的信息交换
 - 口说耳听，语言交流
 - 手动眼看，手语交流
 - ...
- 通信系统
 - 发射机：口、手、身、... 激励器
 - 接收机：耳、眼、肤、... 传感器
 - 信息载体：语言、手语、体语、...
- 问题：实现通信的人体五官被局限在人体小的范围内，严重影响通信距离



如何提高通信距离？

- 增加发射机功率
- 提高接收机灵敏度
- 改善信道、改变信道
- 借助简单的符号体系实现特定信息快速的远距离传输
 - 击鼓、鸣金、烽火、...
- 借助复杂的符号体系实现复杂信息的远距离传输
 - 文字、书信
 - 驿政、邮政系统



远距离通信中的关键问题

- 实时性和无失真可确保远距离信息交换的有效性
- 直至19世纪开始的电磁波通过电缆或自由空间实现的信息传递，才真正解决了远距离通信的有效性
 - 实时性：光速，最快的速度
 - 无失真：由通信系统设计及信号处理技术保障
 - 远距离：电磁波动传播

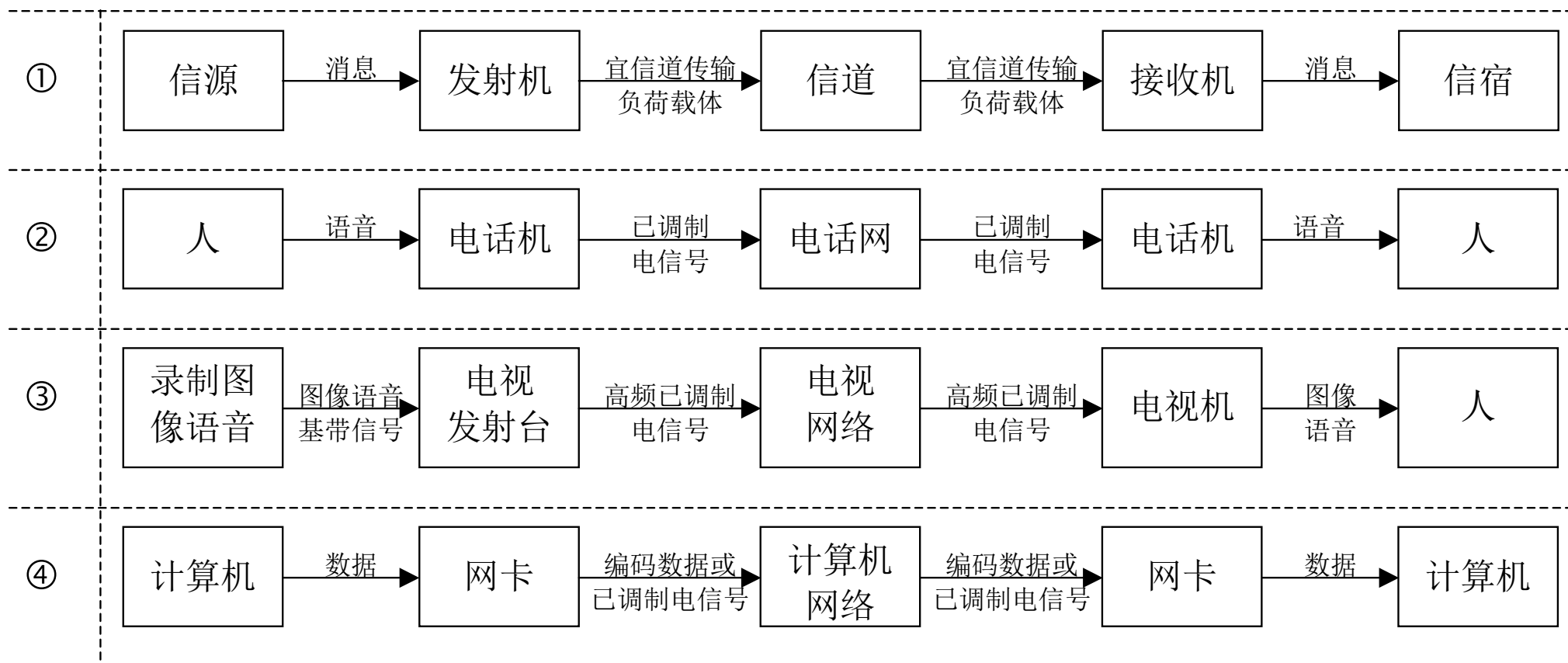


1.1 现代通信系统构成

- 现代通信系统：这里特指用电信号做为信息载体的通信系统
 - 信源message source：信息的提供者或发布者
 - 信宿message sink：信息的接收者，最终信宿一般是人
 - 毕竟通信系统的建立是为人服务的
 - 发射机transmitter：将信源发布的不适宜于信道传输的消息转换为适宜于信道传输的消息形式
 - 接收机receiver：接收消息并转换为信宿可理解的消息形式
 - 信道channel：通信媒质

现代通信系统举例

■ ②电话语音通信系统 ③电视图像通信系统 ④计算机数据通信系统





这门课...

- 重点讨论无线通信系统中的射频发射机和射频接收机
 - Wireless Communication: 无线通信
 - 媒质（信道）非人工有意实现的
 - Radio Frequency Communication: 射频通信
 - 消息远距离传输的载体是高频电磁波
 - 高频电路，非线性电路，通信电路
- 这门课重点研究完成无线通信的射频收发信机系统与电路原理
 - 特别是讨论模拟电路对信号的处理，同时增加集成电路中的收发信机结构讨论



1.2 通信系统的分类

- 有线通信、无线通信
 - 按照传输媒介划分
- 数字通信与模拟通信
 - 按照基带信号划分
- 单工、双工、半双工
 - 按照信号传递方向划分



1.3 通信系统的基本特性 (1)

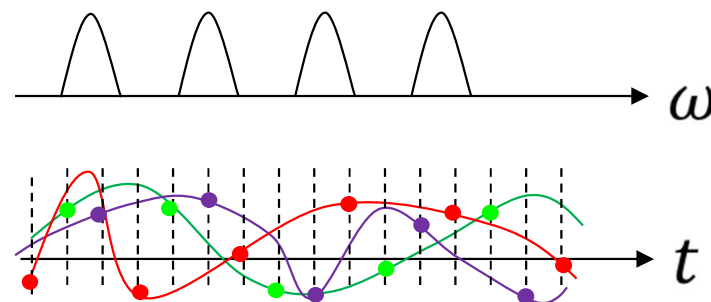
■ 传输距离

- 信号从发送端到达接收端并能被可靠接收的最大距离
- 影响传输距离的因素
 - 通信体制
 - 点对点通信
 - 发送端的信号功率（发射机）
 - 接收机的接收灵敏度（接收机）
 - 信号通过信道的损耗（和频率有关）
 - 信号通过信道混入各种形式的干扰和噪声（频带）

通信系统的基本特性 (2)

■ 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
 - 通信容量越高, 通信系统的经济效益就越高
- 影响信道容量的因素
 - 可分配频谱资源/已调制信号所占用的频带宽度
 - 国际规定电话信号的频带是300 ~ 3400Hz
 - 中波调幅广播 (535kHz-1605kHz) 中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是8MHz
 - 信道多址复用的方式
 - 频分复用 (FDMA)
 - 时分复用 (TDMA)
 - 码分复用 (CDMA)
 - 空分复用 (SDMA)





通信系统的基本特性 (3)

- 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
- 产生信号失真的原因
 - 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



通信系统的基本特性 (4)

- 抗干扰能力
 - 通信系统抵抗干扰的能力
 - 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
 - 提高通信系统抗干扰能力的技术
 - 系统设计
 - 包括高质量的调制方式及调制解调电路
 - 电路设计
 - 低噪声技术
 - 线性化技术



二、射频通信系统中 信号处理的四个基本环节

- 基本环节：调制与解调
- 性能环节：上下变频
- 必要环节：放大
- 必要环节：滤波

2.1 调制与解调

- 信源产生或采集的信号称为基带信号
- 基带信号一般是低频信号，不适宜于无线信道传播
 - 电路中的电压、电流转换为自由空间的电磁波，需要天线，而天线尺寸和波长相当。低频所要求的天线尺寸不能实现，无法有效地将能量耦合到自由空间
 - 语音基带信号：300Hz-3.4kHz
 - 1kHz, $\lambda/4$ 天线, 75km
- 如果将基带信号调制到高频，则天线尺寸下降，适宜于无线信道传播（有效地将能量耦合到自由空间）
 - 1MHz（中波广播频段）， $\lambda/4$ 天线, 75m
 - 950MHz（GSM手机波段）， $\lambda/4$ 天线, 8cm
- 信道拥堵现象也因此得以解决



调制

- 调制
 - 将消息负荷到消息载体，便于传输
- 解调：调制的逆过程
 - 从消息载体中还原出原来的消息
- 以正弦波调制为例
 - 消息负荷在什么地方？



正弦波调制

消息 $v_b(t)$ 需要传输的信息体现在 $v_b(t)$ 变化中

载体：载波 $v_c(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$ 单频

幅度调制 $A(t) = A_0 + k_{AM} \cdot v_b(t)$

频率调制 $\omega(t) = \omega_0 + k_{FM} \cdot v_b(t)$

相位调制 $\varphi(t) = \varphi_0 + k_{PM} \cdot v_b(t)$

$$v_c(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

幅度、频率、相位调制

幅度调制

$$v_{SAM}(t) = (A_0 + k_{AM} v_b(t)) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

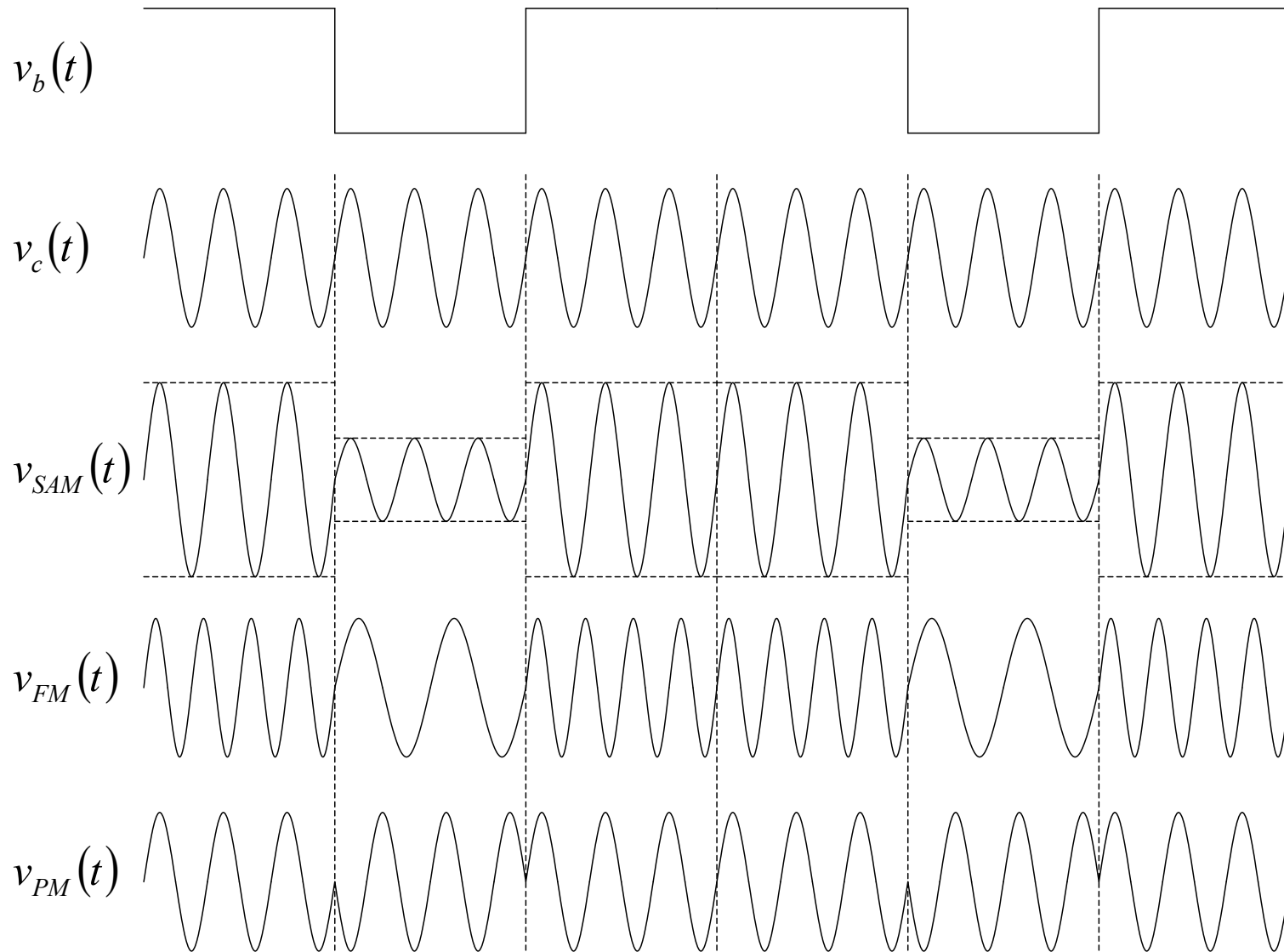
频率调制

$$\begin{aligned} v_{FM}(t) &= A_0 \cos\left(\int_0^t \omega(\tau) d\tau + \varphi_0\right) \\ &= A_0 \cos\left(\omega_0 t + k_{FM} \int_0^t v_b(\tau) d\tau + \varphi_0\right) \end{aligned}$$

相位调制

$$v_{PM}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + k_{PM} v_b(t) + \varphi_0)$$

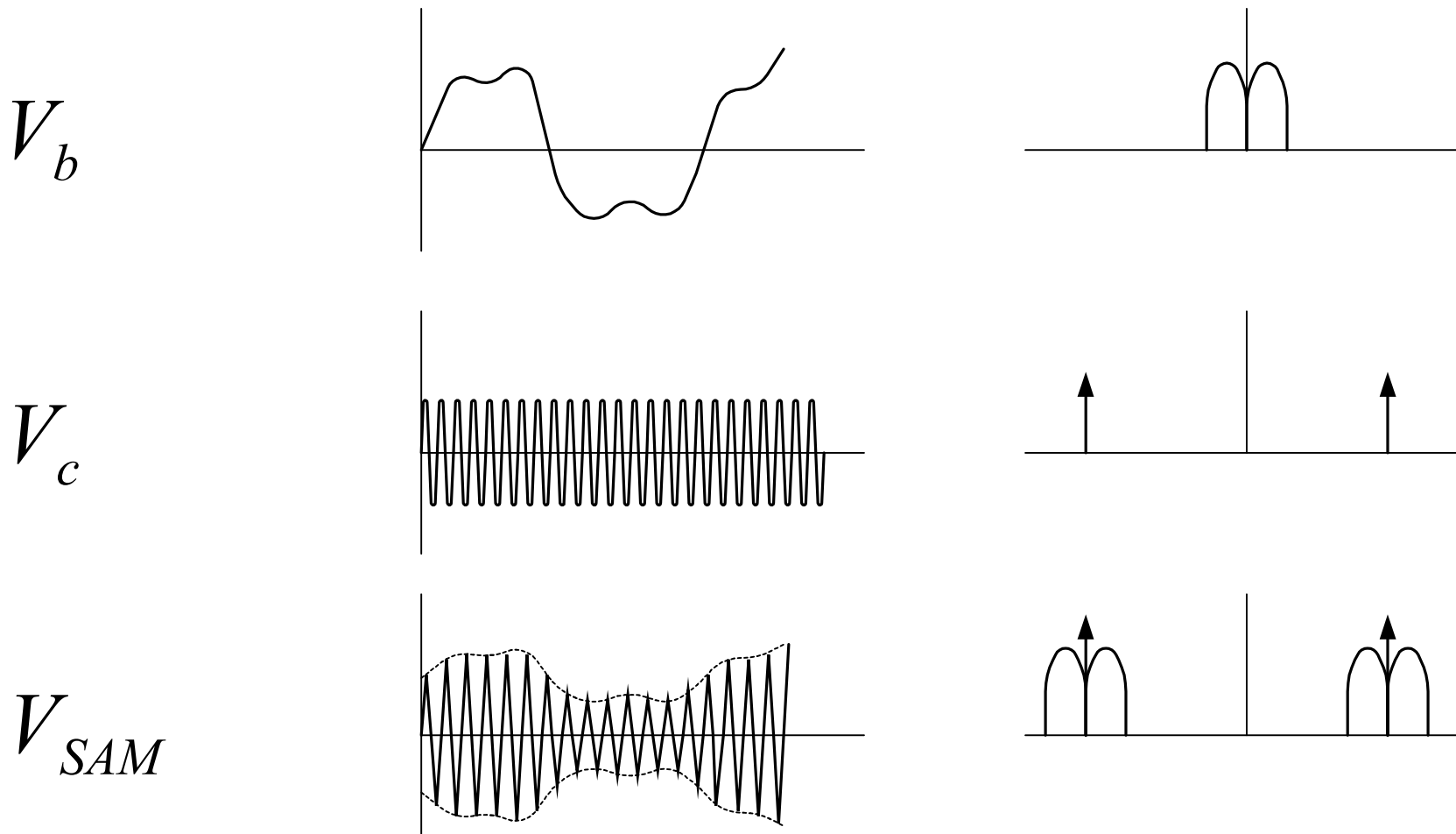
调制后波形



$$v_{SAM}(t) = (A_0 + k_{AM} v_b(t)) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

调制后频谱

■ 以标准调幅波为例





2.2 上变频与下变频

■ 上变频

- 为了降低设计复杂度，往往在某个固定的较低频率的频点上先实现调制，这个低频频点被称为中频（IF---Intermediate Frequency），然后再把已调制的中频信号上变频到发射频点上，即射频（RF---Radio Frequency）
- 调制环节完成的幅度、频率或相位调制不希望在上变频环节发生变化，因此上变频过程一般仅仅是一个频谱的线性搬移过程，将中频已调波的频谱分量从中频位置原样搬移到射频位置，这个搬移过程中，频谱结构不应发生改变
- 上变频多用于发射机中

■ 下变频：

- 和上变频相逆，在接收机中，下变频过程将频谱从射频线性搬移到中频，之后在固定中频上完成解调等信号处理过程

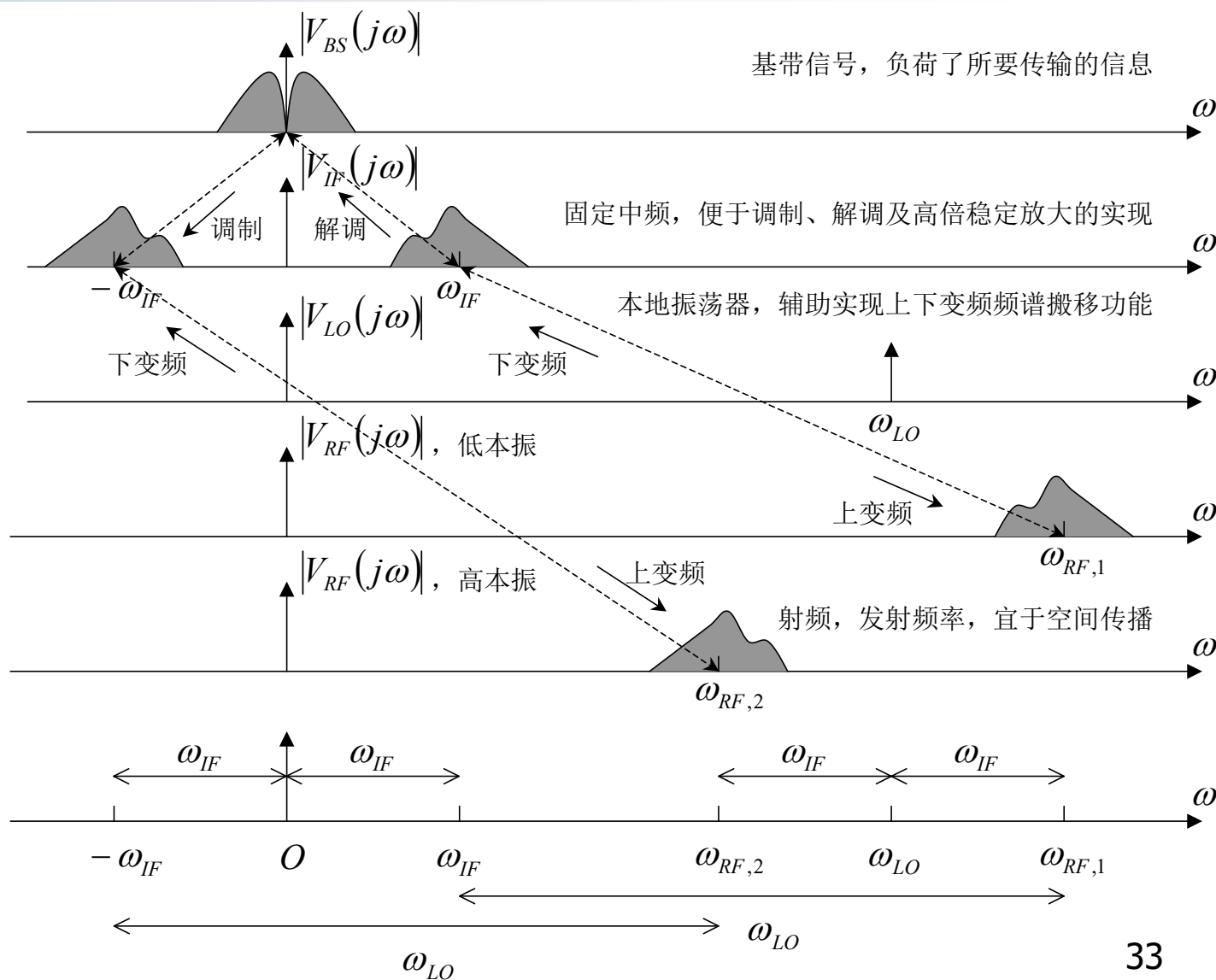
上下变频

$$v_{M,IF} = A(t)\cos(\omega_{IF}t + \varphi(t))$$

上变频 ↓ ↑ 下变频

$$v_{M,RF} = A(t)\cos(\omega_{RF}t + \varphi(t) + \varphi_0)$$

- 上下变频过程中，
负荷的信息形式不发生变化，
变化的仅仅是载波中心频率



本地振荡器

$$\omega_{IF} = \omega_{RF} - \omega_{LO}$$

- 完成上下变频，用乘法器
 - 需要本地振荡器

$$\cos \omega_{RF} t \cdot \cos \omega_{LO} t = \frac{1}{2} \cos(\omega_{RF} - \omega_{LO}) t + \frac{1}{2} \cos(\omega_{RF} + \omega_{LO}) t$$



$$\cos \omega_{IF} t$$

$$\omega_{RF} = \omega_{IF} + \omega_{LO}$$

上下变频的好处

- 固定中频上完成调制与解调，调制与解调的性能优良
- 通过改变本振频率，实现电台的调谐选台，调谐方便
- 在不同频率点上（射频、中频、基带）分别实现放大，收发信机稳定性提高
- 由于上下变频环节的存在，整个系统性能明显提高



2.3 放大

- 电磁波在自由空间或其他信道中传播时，信号幅度随传输距离的增加而**衰减**
- 信道中的衰减除了距离因素外，还有其他因素，如信道不均匀不连续性等原因导致的反射、折射、散射等也可能导致额外的衰落，发射机和接收机中的**放大环节**主要就是为了抵偿信道引入的衰减：**必要环节**
- **接收机**中必须有放大器将信号**电平调整**到解调器能够正常工作的电平范围内
 - 接收机中的关键放大器是**射频低噪声放大器**和**中频高增益放大器**
- 提高**发射机**的发射功率可有效提高传输距离，因此发射机中的最主要的放大部件为末端的**功率放大器**

理想线性放大

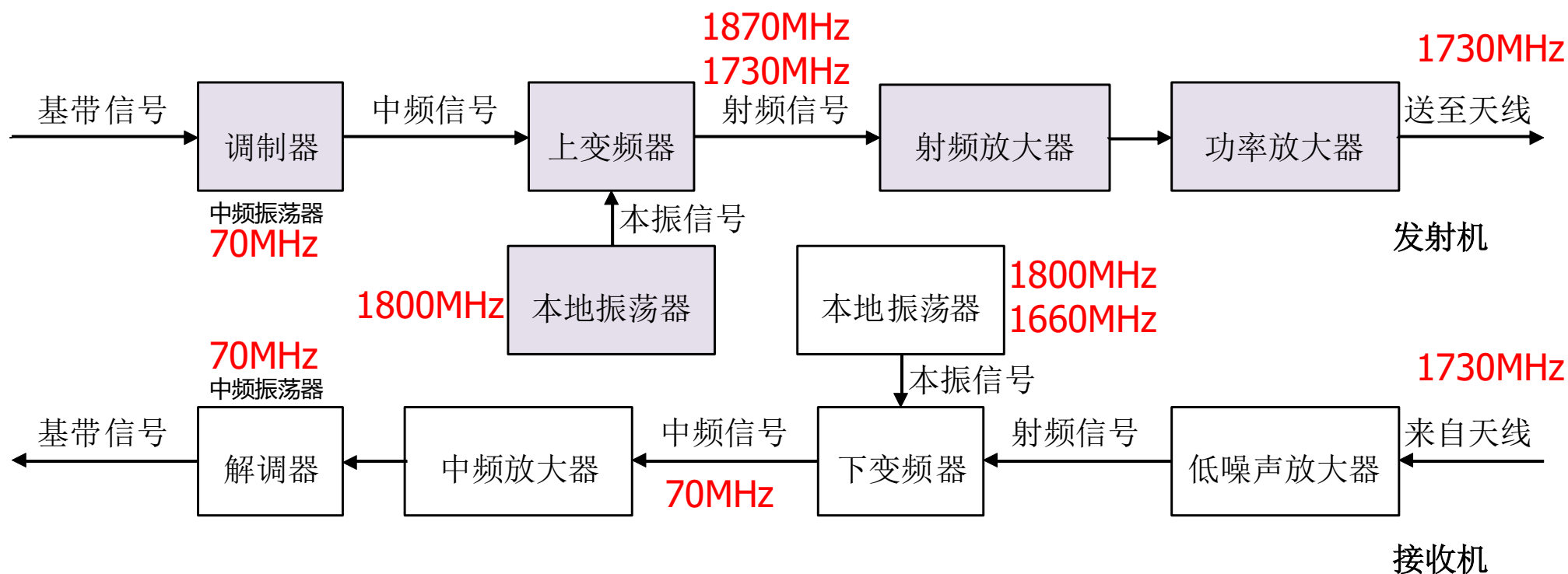
- 理想放大完成信号幅度的放大，信号波形只有比例变化和延时，波形前后一致，没有失真
 - 放大器中存在滤波环节，则有延时
 - 寄生或人为设计

$$v_{in}(t) = A(t)\cos(\omega_0 t + \varphi(t))$$

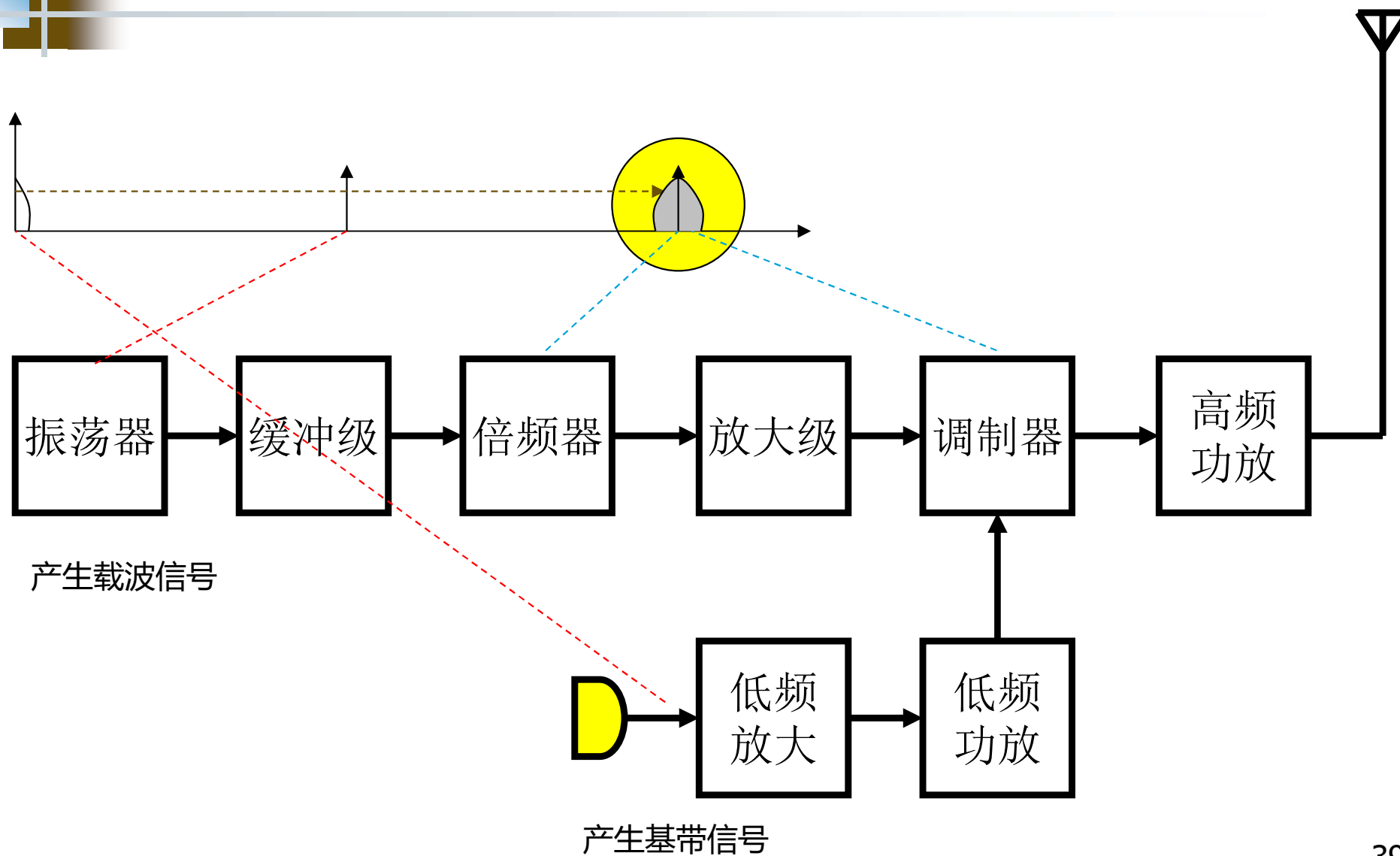
$$v_{out}(t) = k_0 \underbrace{A(t - \tau_0)}_{\text{}} \cos(\omega_0(t - \tau_0) + \underbrace{\varphi(t - \tau_0)}_{\text{}} + \varphi_0)$$

典型射频通信发射机和接收机

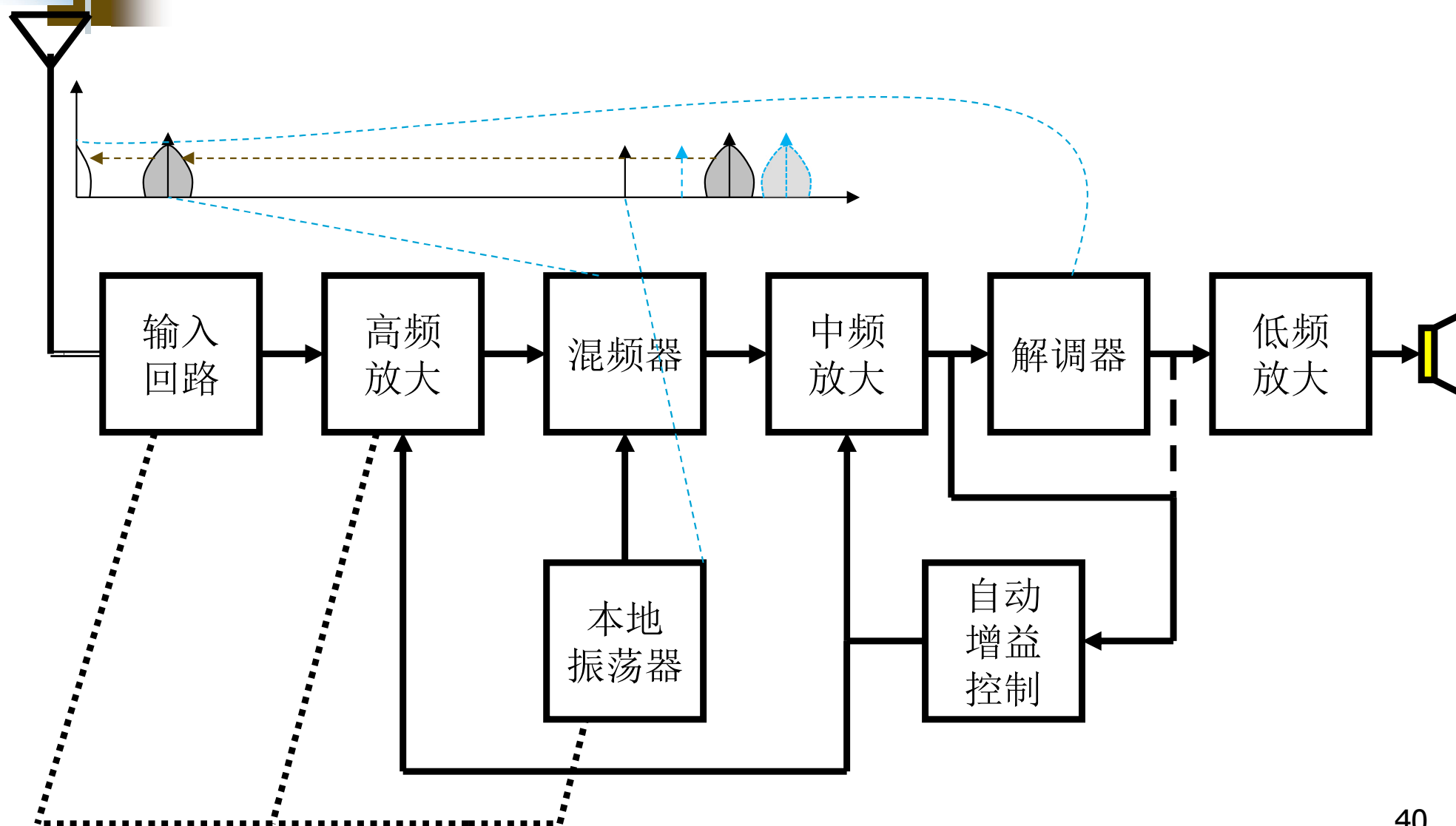
■ 调制解调环节，上下变频环节、放大环节



一个发射机例子



一个接收机例子



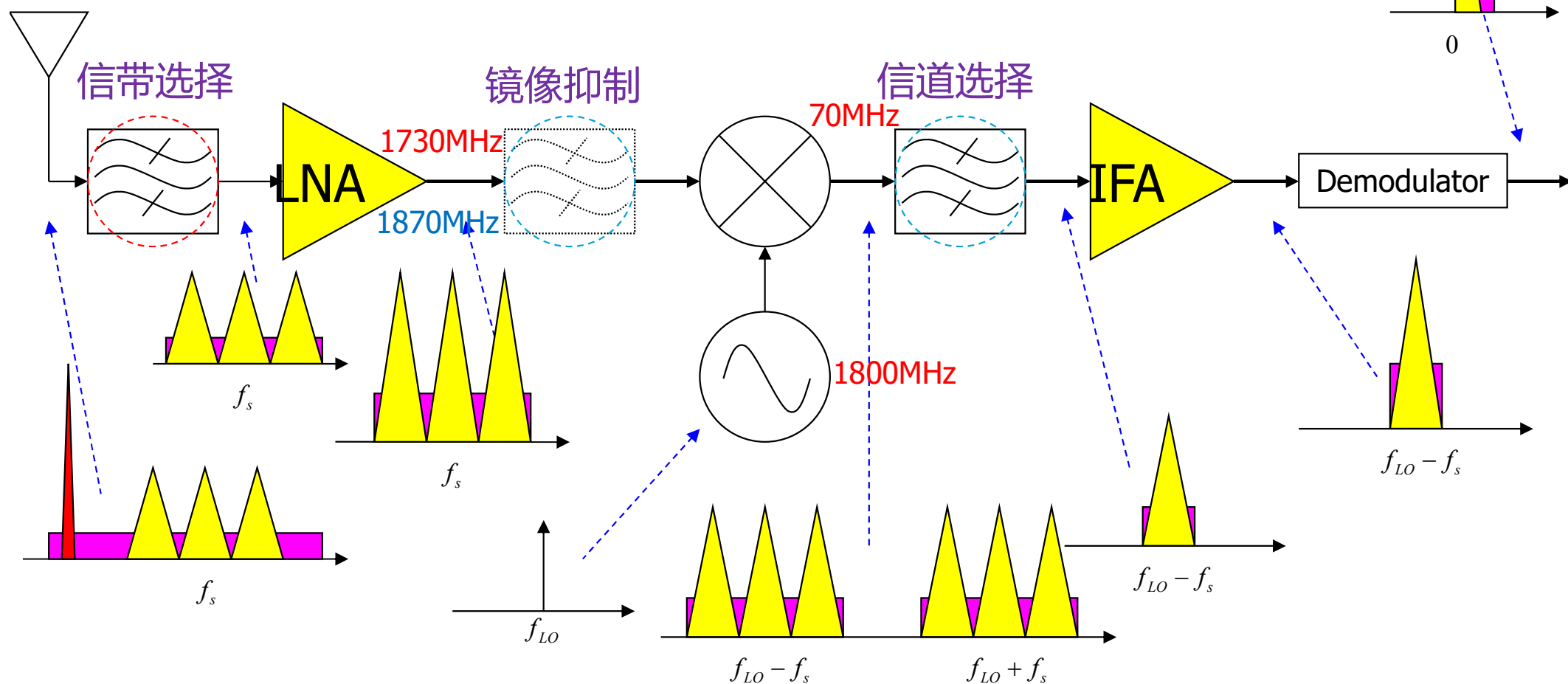


2.4 滤波

- 收发信机中，射频、中频、基带，在完成调制解调、上下变频、放大等环节后，因为电路或系统结构的不完善/非理想，会出现很多不需要的频谱分量，这些不需要的频谱分量，需要滤波器将其滤除
- 滤波环节是一个必要环节
 - 发射机无滤波器：频谱灾难，电磁环境极度恶劣，无法维持正常通信
 - 接收机无滤波器：无法正常接收有用信号

例：接收机中的滤波器

- 滤波：通过或抑制某个频带的信号





三、信号传输的基本问题

- 通信系统中的信号传输，即信号通过通信设备的电路和传输信道，涉及到信号通过线性系统与非线性系统的问题
 - 线性系统
 - 线性放大器（低噪声放大器），滤波器，积分器，锁定状态的锁相环路
 - 线性时不变系统理论在《信号与系统》课程中有详尽的讨论
 - 非线性系统
 - 非线性放大器（C、D、E、F类功率放大器），倍频器，调制器，振荡器
 - 时变线性电路：乘法器，混频器（上下变频器）



线性、非线性

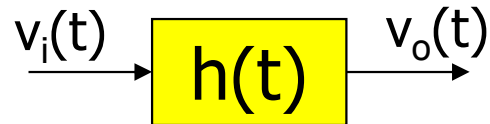
- 线性：满足叠加性和均匀性
- 非线性：不满足叠加性或均匀性

- 时不变：系统参量不随时间而变化，是定常量
- 时变：系统参量随时间而变化

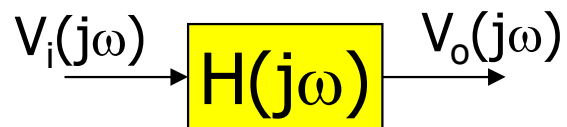
- 线性时不变：滤波器、小信号放大器
- 线性时变：上下变频器、幅度调制器
- 非线性：大信号放大器、频率/相位调制器、振荡器

信号通过线性系统

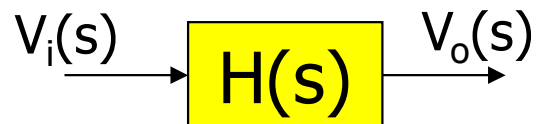
- 线性时不变系统可以用冲激响应、传递函数（转移函数）表示



$$v_o(t) = \int_0^t h(\tau) v_i(t - \tau) d\tau$$



$$V_o(j\omega) = H(j\omega) V_i(j\omega)$$



$$V_o(s) = H(s) V_i(s)$$



理想线性系统

$$H(j\omega) = Ae^{-j\omega\tau}$$

$$v_i(t) = x(t)$$

$$v_o(t) = Ax(t - \tau)$$

■ 无失真传输

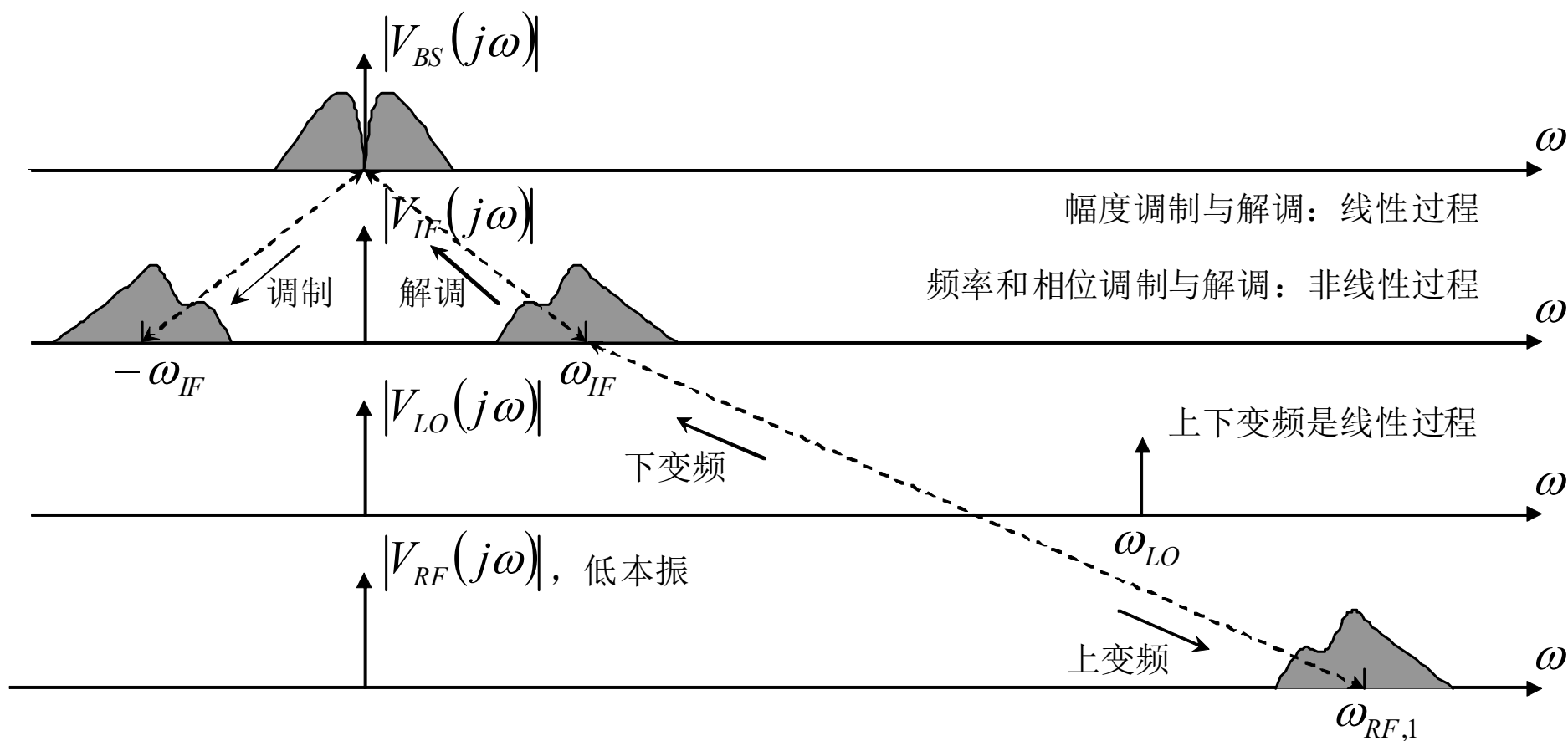
- 信号通过理想线性系统后，输出信号是输入信号的放大和延时

■ 线性失真

- 线性系统若非理想，就会产生幅度失真和相位失真

信号通过线性系统

■ 对应频谱分量满足叠加性和均匀性



信号通过非线性系统

- 信号通过非线性系统，最主要的特点是将会产生出新的频率分量
 - 在要求无失真传输场合下，应尽量避免信号通过非线性系统产生新的频率分量：电路器件应尽量避免工作在非线性状态
 - 我们可以利用信号通过非线性系统产生新的频率分量这一特点，应用于通信系统的混频器、调制器等的设计

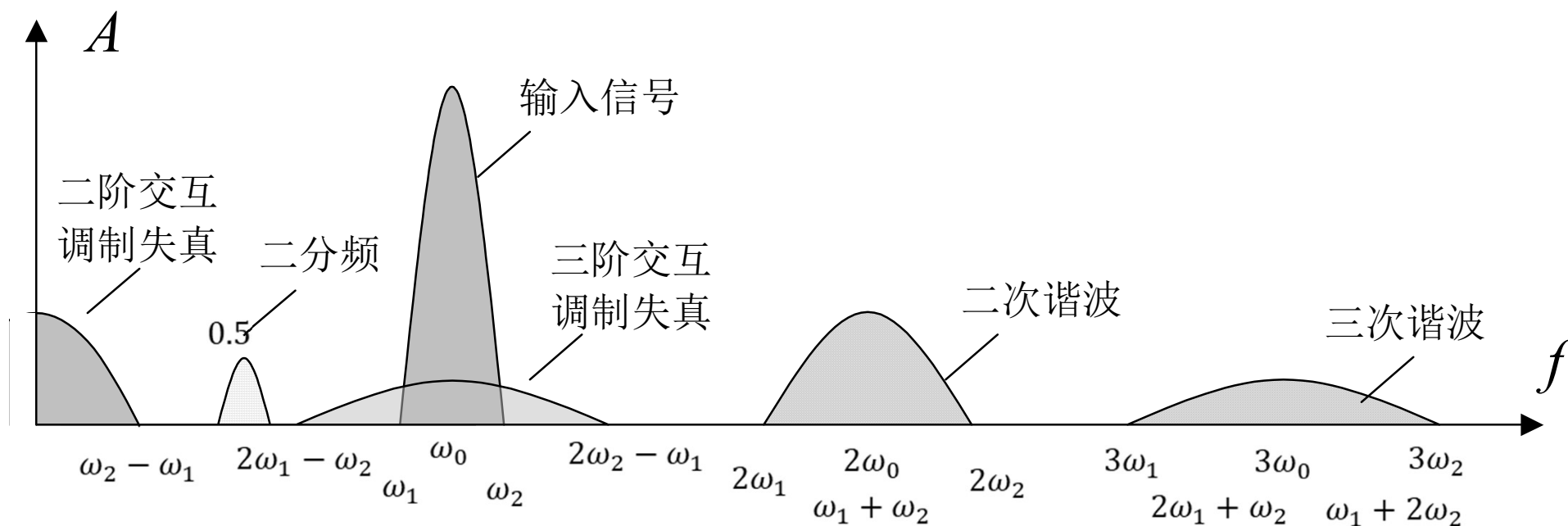
$$v_i(t) = V_{1m} \cos \omega_1 t + V_{2m} \cos \omega_2 t$$

$$v_o(t) = f(v_i(t)) = a_0 + a_1 v_i(t) + a_2 v_i^2(t) + \dots$$

$$\begin{aligned} v_o(t) = & a_0 + \frac{a_2}{2} (V_{1m}^2 + V_{2m}^2) + a_1 V_{1m} \cos \omega_1 t + a_1 V_{2m} \cos \omega_2 t \\ & + \frac{a_2 V_{1m}^2}{2} \cos 2\omega_1 t + \frac{a_2 V_{2m}^2}{2} \cos 2\omega_2 t \\ & + a_2 V_{1m} V_{2m} \cos(\omega_1 + \omega_2)t + a_2 V_{1m} V_{2m} \cos(\omega_1 - \omega_2)t \end{aligned}$$

信号通过非线性系统

- 产生诸多新的频谱分量



信号通过一个非理想线性放大器后的频谱变化示例



输出频谱分量看线性还是非线性？

- 假设输出存在（输出为零即为不存在）
- 可从是否满足均匀性判定：
 - 如果输入增加1dB，输出相应增加1dB，则为线性
 - 如果输入增加1dB，输出的变化不是‘增加1dB’，而且其它变化，则为非线性
- 可从是否满足叠加性判定：
 - 单独两个输入 x_1 ， x_2 ，分别记录其输出 y_1 ， y_2
 - 两个输入叠加后做为输入 $x_1 + x_2$ ，是否出现了新的频率分量（超出 $y_1 + y_2$ 给出的频率分量）：如果出现了，则一定存在非线性



信噪比与通信容量

- 现代数字通信中，通常以传输的数据比特位表示信息量大小，根据香农定理，假设信道内的噪声为高斯白噪声，则信道内每秒所能传输的最大数据比特位为

$$C = B_w \log_2(1 + S/N)$$

- C称为信道容量，也就是信息传输率大小，单位为bps (bit/s)， B_w 为信道带宽，S为信道带宽内信号功率，N为信道带宽内噪声功率，S/N被称为信噪比 (SNR, Signal Noise Ratio)

$$C = B_w \log_2(1 + S/N)$$

噪声与干扰

- 若想获得足够大的信道容量，需要足够宽的信道带宽，或者足够大的信噪比
 - 信道带宽：信道带宽受限于频谱资源及无线电管理委员会对其的分配
 - 信号功率：电磁环境和电波秩序的要求，使得发射功率也是受限的；
 - 噪声功率：如果只考虑信道高斯白噪声，该噪声功率和温度、信道带宽成正比关系。由于无线通信的广泛应用，无线信道中一般都会有其他信道的杂散信号或同频干扰信号，因而需要无线电管理，对频谱资源、发射功率、带外杂散等进行规范
- 在接收机和发射机中，电路器件噪声、非线性失真杂散分量会恶化信号质量，这些干扰是限制通信系统性能的主要因素
 - 噪声和干扰问题我们放在第3章和第4章进行详尽的讨论



四、课程具体内容

- 课程内容对应射频通信系统中信号处理的四个基本环节
 - 调制与解调：第6章调制与解调
 - 增加集成电路中的收发信机正交结构讨论
 - 上下变频：第4章非线性基本问题
 - 振荡器：第5章正弦波振荡器，第8章频率综合器
 - 放大：第3章放大器
 - 滤波：第2章滤波器
- 和系统有关的问题
 - 负反馈控制系统：锁相环（第7章锁相环），自动增益控制（第3章放大器顺带），自动频率控制（第7章锁相环顺带）
 - 射频通信系统结构：第6章调制与解调顺带
- 噪声与干扰
 - 噪声：第3章放大器顺带
 - 干扰：第4章非线性基本问题顺带



课程内容特点

- Radio Frequency: RF
 - 射频，无线电
- 原理性、工程性
 - 既有系统级概念，又有电路细节问题
 - 原理性强，概念多，应掌握简单的工程近似处理
- 通信电路类型多，完成同一功能的电路形式也多种多样
 - 电路是如何完成功能的原理的说明
 - 可完成基本功能的典型的模拟电路分析
- 课程特点
 - 要求把握基本工程处理方法
 - 授课强度大，要求同学紧跟教师思路，课后花费足够的时间来消化课程内容



预习

- 下节课内容预告
 - 匹配、传输、反射、滤波
- 其他课程中有关传输、匹配的概念
 - 《信号与系统》、《电子电路与系统基础》、《电路原理》、...
 - 最大功率传输匹配、...

作业一、信号通过线性系统

- 线性系统的传递函数为 $H(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$,
假定输入信号为 $x(t) = \cos t + \cos 2t$, 通过该线性系统后, 请给出输出信号 $y(t)$ 的表达式, 并把下列三种情况的输入输出信号画在同一幅图上进行比较, 说明是否有线性失真, 其中 $k = \frac{\pi}{2}$:
 - 1) $A(\omega) = 1$, $\varphi(\omega) = -k\omega$
 - 2) $A(\omega) = \omega$, $\varphi(\omega) = -k\omega$
 - 3) $A(\omega) = 1$, $\varphi(\omega) = -k$

信号通过非线性系统

- 作业二、信号通过线性系统是否会产生失真？是否可以通过级联其他系统消除？信号通过非线性系统是否会产生失真？是否可以通过级联其他系统消除？
- 作业三、假设某系统的输入信号为 $x(t) = A \cos \omega_0 t$ ，请设计一个系统，该系统的输出为
$$y(t) = \frac{A}{4} \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + \frac{A^2}{8} \cos(2\omega_0 t + \varphi_2)$$
请画出系统可能的实现框图。



CAD

- 各位同学本周内应熟练进入Cadence教学平台进行简单仿真