



通信电路原理

期末复习



复习总纲

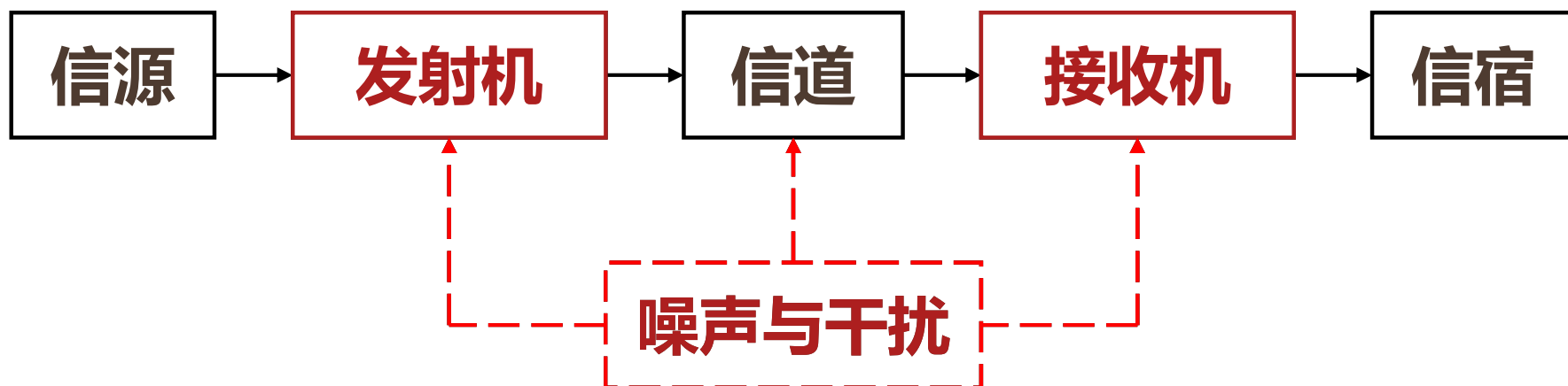
- **以射频通信电路功能实现为线索，理顺射频通信系统各功能模块的基本原理**
- **考察射频通信系统收发信机及其功能电路实现原理**
 - **考试以概念、电路模块功能的理解为主，计算属理解基础之上的基本功**
 - **注重概念的理解和应用，掌握常用电路的分析方法**
 - **参考往年考题，考题类型基本类同**



复习大纲

- 一、射频通信系统的信号处理环节
 - 四个基本环节、系统结构、噪声与失真
- 二、调制与解调
- 三、上下变频
- 四、放大与振荡
- 五、滤波
- 六、反馈控制
- 七、总结

一、通信系统基本概念



- 根据对射频通信系统不同的要求，提出不同的指标，有不同的系统设计方案和信号处理方法
 - 发射机和接收机系统实现是多种多样的，课程仅是展示了最典型的系统实现方案和电路原理



无线通信系统的四个基本环节

■ 调制与解调

- **基本环节:利于信息传输**

将不适宜于无线信道传输的基带低频信号调制到适宜于信道传输的射频高频信号上,从而实现远距离的无线传输

■ 上下变频

- **性能环节:提高系统性能**

外差式收发机结构把大部分信号处理功能置于固定中频,系统性能明显提高:稳定性/功耗/调制解调性能/成本

■ 放大

- **必要环节:提高传输距离**

抵消远距离传输带来的功率损耗

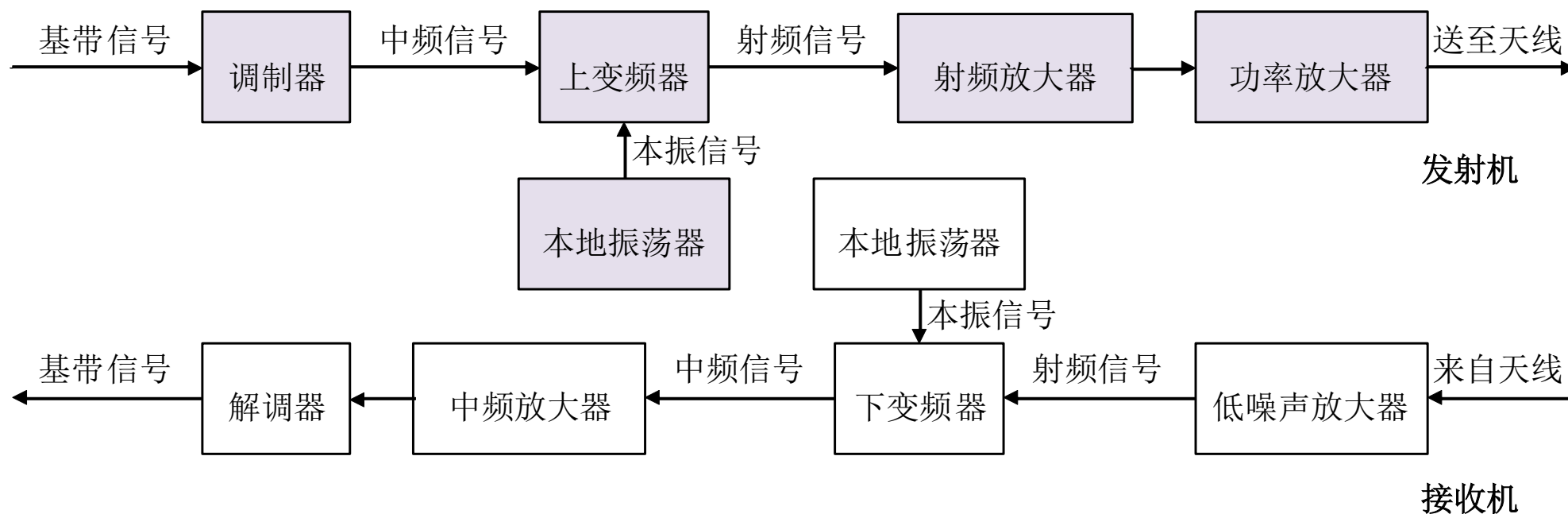
■ 滤波

- **必要环节:提高信噪比**

滤除信道外的干扰信号,提高信噪比,提高发射和接收性能

射频收发机典型框图

- 图中各部件前后,都存在某种滤波机制
 - 外加滤波器
 - 电路内部滤波机制:谐振选频,RC低通选频



为什么采用外差式结构?

■ 接收信号的特点

- 信号频率高
 - 利于传输/低频信道太拥挤
 - 射频电路:功耗高,难实现
- 信号功率微弱
 - 长距离传输
 - 需多级放大: 容易产生不稳定
- 多信号同时到达接收端
 - 需要较好的信道选择能力
 - 射频滤波Q值要求极高

超外差结构解决方案:

下变频到中频频段

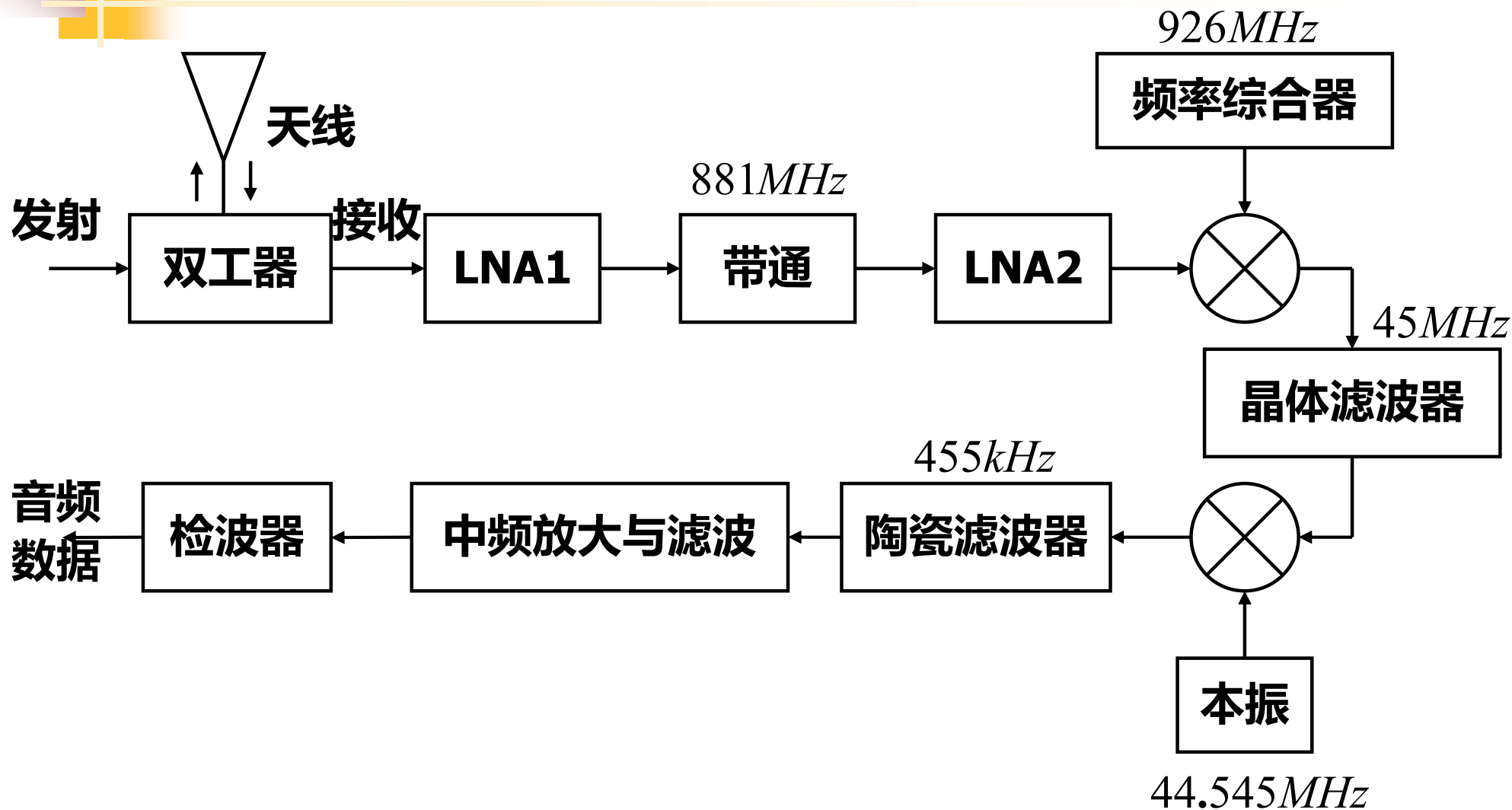
**多个频段放大, 固定中频
高增益放大, 解调**

多个频段分别滤波

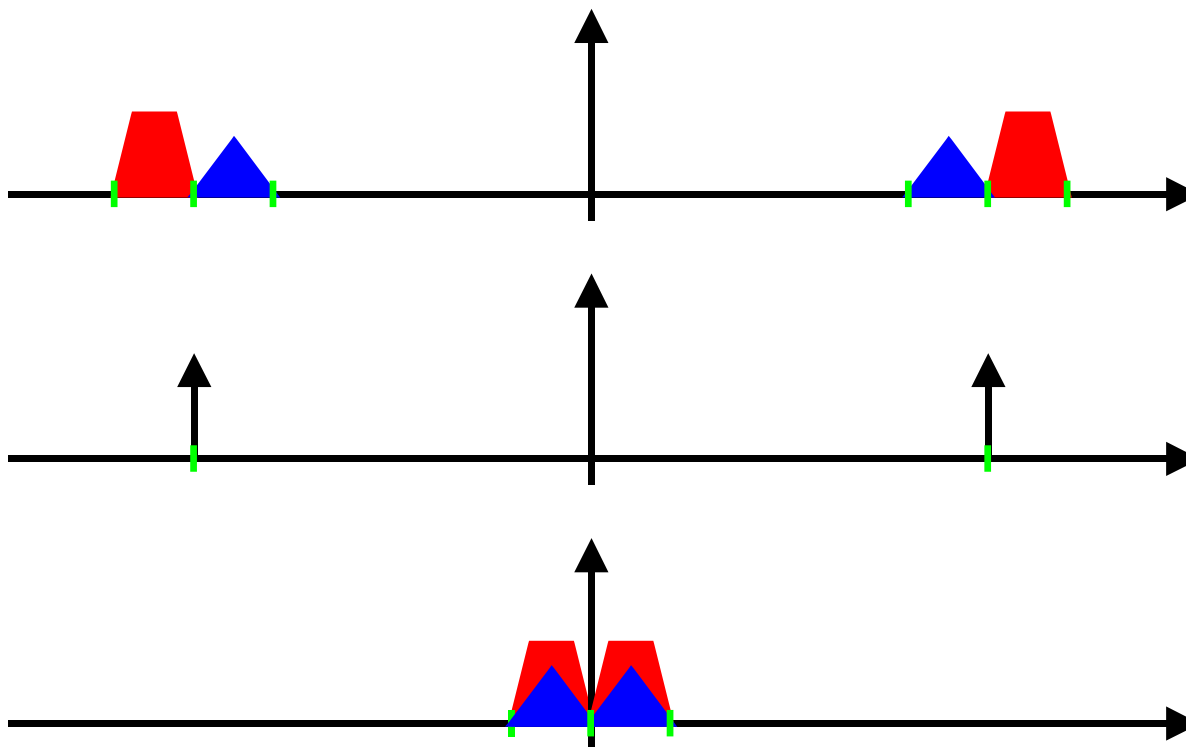
超外差接收机的缺点

- 外差式接收机最大的缺点是组合干扰频率点多，如交调干扰、互调干扰等；在寄生通道中，镜频干扰现象最为严重
 - 镜像频率干扰是外差式接收机的结构性缺陷
 - 即使是理想变频器,镜像频率干扰也是不可避免的
 - 消除镜频干扰，最为直接的方法是不让它进入变频器，这全靠变频器之前的镜像抑制滤波器来实现
 - 高中频方案：增大中频频率，可以抑制镜频，但中频信道选择滤波器实现难度增加
 - 二次变频方案：两次变频，第一次混频采用高中频，以降低镜像抑制滤波器设计难度，第二次混频采用低中频，以降低中频信道选择滤波器设计难度
 - 零中频方案：中频为零，则没有镜像频率干扰
 - 采用镜频抑制接收方案
 - Hartley结构，Weaver结构

二次变频方案：蜂窝移动电话



零中频方案：直接下变频

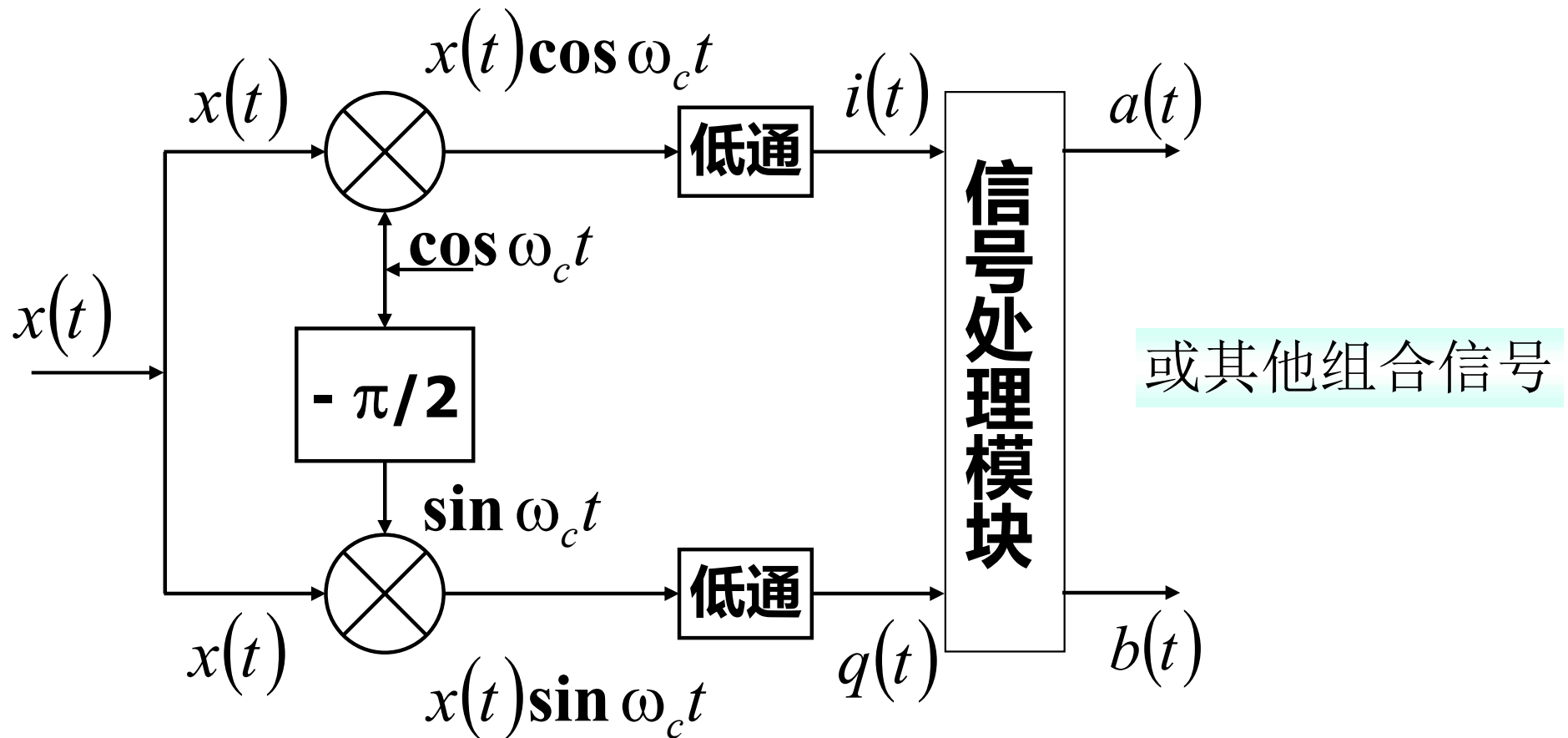


假设:
$$x(t) = \left[\frac{1}{2} a(t) \cos \omega_c t + \frac{1}{2} a'(t) \sin \omega_c t \right] + \left[\frac{1}{2} b(t) \cos \omega_c t - \frac{1}{2} b'(t) \sin \omega_c t \right]$$

正交解调

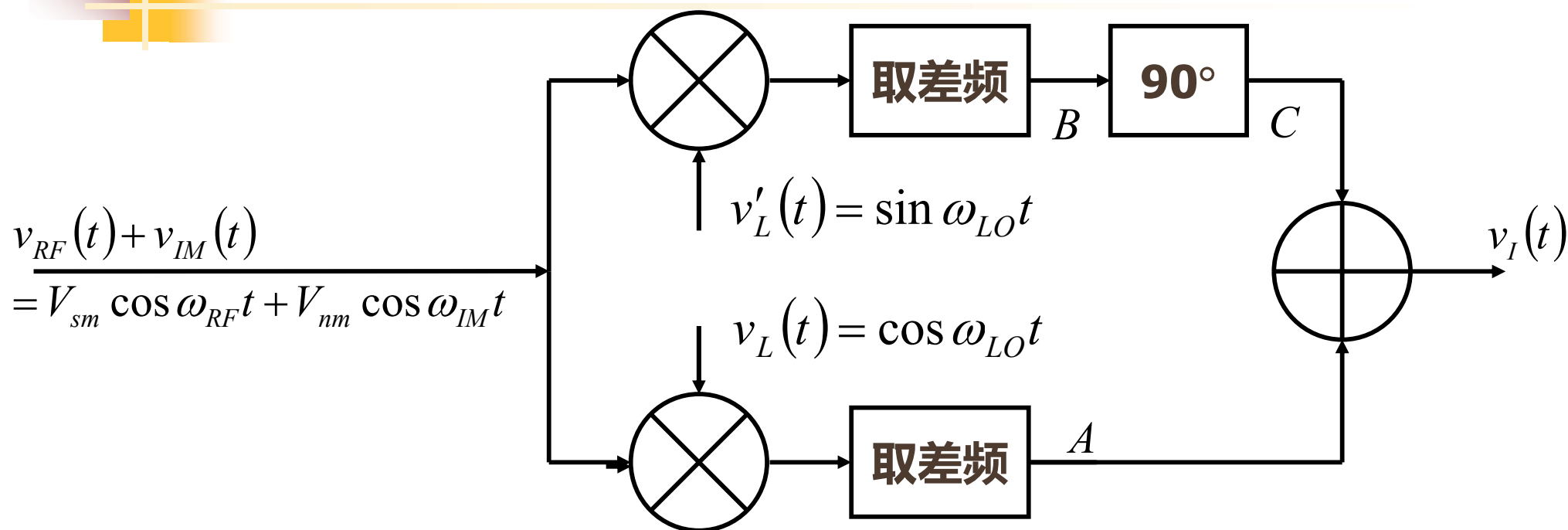
$$i(t) = \frac{1}{2} (a(t) + b(t)) \quad q(t) = \frac{1}{2} (a'(t) - b'(t))$$

$$q'(t) = \frac{1}{2} (-a(t) + b(t))$$



- 这个方案要求两条支路完全一致，包括本振幅度、混频器的变频增益，滤波器的特性等；同时要求正交的准确度很高；宽带移相器

Hartley结构



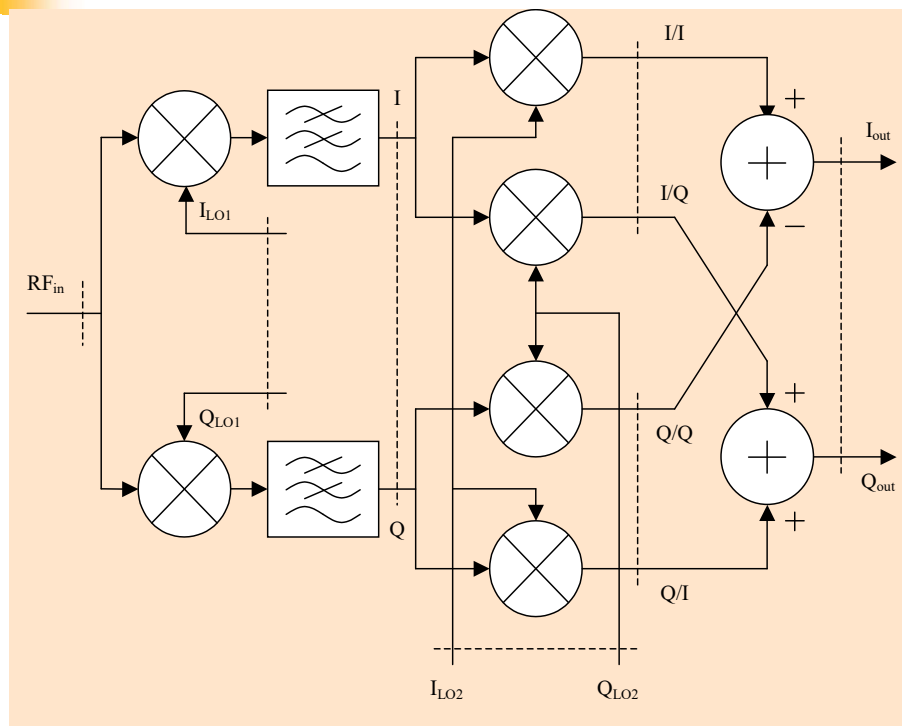
$$v_A(t) = \frac{V_{sm}}{2} \cos(\omega_{LO} - \omega_{RF})t + \frac{V_{nm}}{2} \cos(\omega_{LO} - \omega_{IM})t = \frac{V_{sm}}{2} \cos \omega_{IF}t + \frac{V_{nm}}{2} \cos \omega_{IF}t$$

$$v_B(t) = \frac{V_{sm}}{2} \sin(\omega_{LO} - \omega_{RF})t + \frac{V_{nm}}{2} \sin(\omega_{LO} - \omega_{IM})t = -\frac{V_{sm}}{2} \sin \omega_{IF}t + \frac{V_{nm}}{2} \sin \omega_{IF}t$$

$$v_C(t) = \frac{V_{sm}}{2} \cos \omega_{IF}t - \frac{V_{nm}}{2} \cos \omega_{IF}t$$

$$v_I(t) = V_{sm} \cos \omega_{IF}t$$

Weaver结构



实现镜像抑制和单边带幅度调制具有相似的电路结构:多次变频滤波结构,正交结构,...

■ 二次正交下变频结构

■ 比照单边带调制的第三种方案

- 去掉一个边带, 保留一个边带
- 两个边带关于中心频率 (频谱和) 位置是镜像对称的

■ Weaver结构

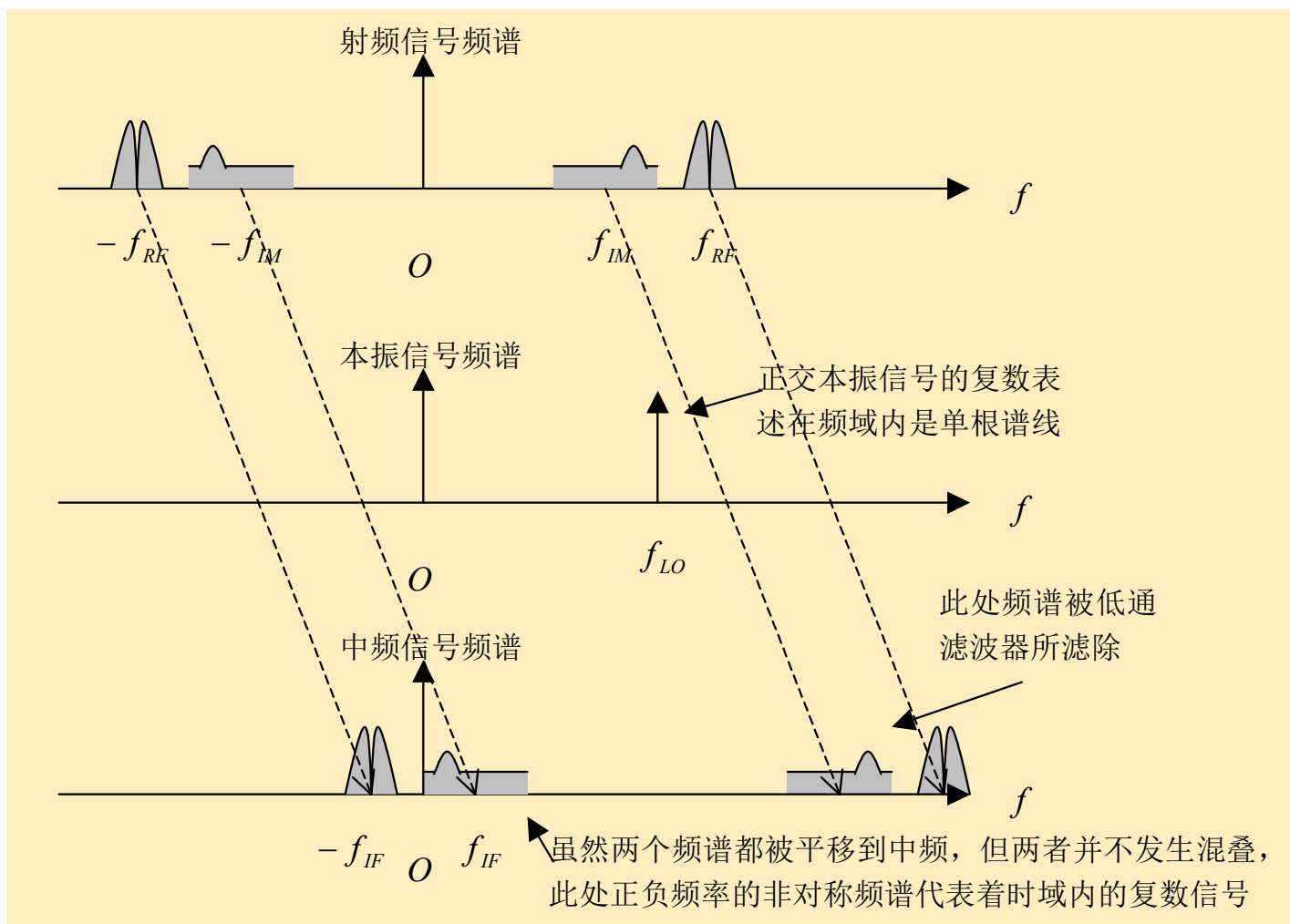
- 去掉IM信号, 保留RF信号
- 两个信号关于本振信号位置是镜像对称的



正交结构

- **正交结构接收机利用正交信号实现正负频率的区分、上下边带的区分、以及有用信号和镜像信号的区分**
 - **IQ两路信号视为复数信号的实部和虚部，用复数信号的运算理解正交结构**
 - **正交结构具有分离正负频率的能力**
 - **要求理解正交信号**

正交信号：正负频谱可区分



射频前端和后端

- **接收机：从低噪声放大器到解调器之前的电路，称为前端电路，前端电路要求是线性的**
 - 有用信号的频谱结构不应该发生变化
- **发射机：调制器之后到功率放大器，称为前端电路**
 - 一般也要求是线性的
 - 功率放大器可能是非线性的，可用于调角波的放大
- **后端电路：调制解调电路，因频谱结构可能发生变化，一般视其为非线性**
 - 调幅是线性的，调角是非线性的



线性/非线性 时变/时不变

- **线性：满足叠加性和均匀性**
 - 多个源，可分别求解，最后叠加/有增益、噪声系数、阻抗等参量描述（线性度）
- **时不变：系统参量不随时间而变化，是定常量**
- **线性时不变：滤波器、小信号放大器，锁定状态锁相环**
 - 可用传递函数描述其特性
- **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**

信道容量与信噪比

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

- **通信系统的基本任务是传送信息，当信号在传输过程中，不可避免地会受到无用信号或噪声的干扰**
 - **这些干扰和噪声对系统传输信号的能力，特别是处理弱信号的能力，将产生极为不利的影响**
 - **有用信号被淹没在噪声里或被干扰信号所覆盖**
- **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**
 - **如何降低噪声？**
 - **线性电路：低噪声设计：级联时前级增益应足够大**
 - **如何降低干扰？**
 - **高线性度电路设计：降低非线性失真的影响：级联时前级增益不能过大**
 - **滤波器：滤除带外干扰**



干扰与噪声

■ 噪声：针对线性电路而言

- 微弱信号易被噪声淹没：噪声分析都是交流小信号分析
- 来源：电阻热噪声、晶体管/场效应管的各种噪声
- 噪声系数：概念及其计算，信噪比概念

■ 干扰

- 产生原因:非线性失真,同频干扰/邻道干扰
- 大信号产生的非线性失真分量可能淹没小的有用信号
- 课件中讨论过的干扰:
 - 非理想线性导致的非线性失真干扰：谐波失真、**三阶互调失真**、...
 - 变频干扰：中频、**镜频**、组合副波道、组合频率、交调、互调干扰（大部分是非线性产生的）



二、调制与解调

- **调制的目的：利于信号传输**
 - **天线尺寸的考虑**
 - 无线传输系统，调制是一个基本环节
 - **多路复用的考虑**
 - 调制可以将不同信号分在同一信道中传输而互不影响，例如频分复用
 - **对信道的考虑**
 - 不同信道有不同的特性，调制可以降低信道对有用信号传输的影响
- **调制是使消息载体的某些特性随消息变化的过程**
 - 调制的作用是把消息置于消息载体，以便传输和处理
 - 解调是调制的逆过程，从消息载体中还原出原来的消息



正弦波调制

消息

$$v_b(t)$$

需要传输的信息体现在 $v_b(t)$ 的变化中

载体：载波

$$v_c(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad \text{单频}$$

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

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

重点：直接调频波的实现和解调电路
综合性强：选频、调频，振荡，AFC，PLL

调制与解调

- **调幅、调频和调相波的性质**
 - **表达式、调制指数、波形、频谱、带宽、功率等相关计算**
- **调幅波**
 - **调幅有几种类型？检波方法？**
- **调角波**
 - **瞬时频率和瞬时相位概念**
 - **线性调制和非线性调制概念**
 - **调频方法？鉴频方法？各自的优缺点？**
 - **变容管直接调频电路**
 - **电路组成、主要元器件的作用、等效电路、及相关计算**
 - **鉴频器：鉴频方法**
 - **典型电路：双失谐鉴频、正交鉴频、锁相鉴频**

基本要求

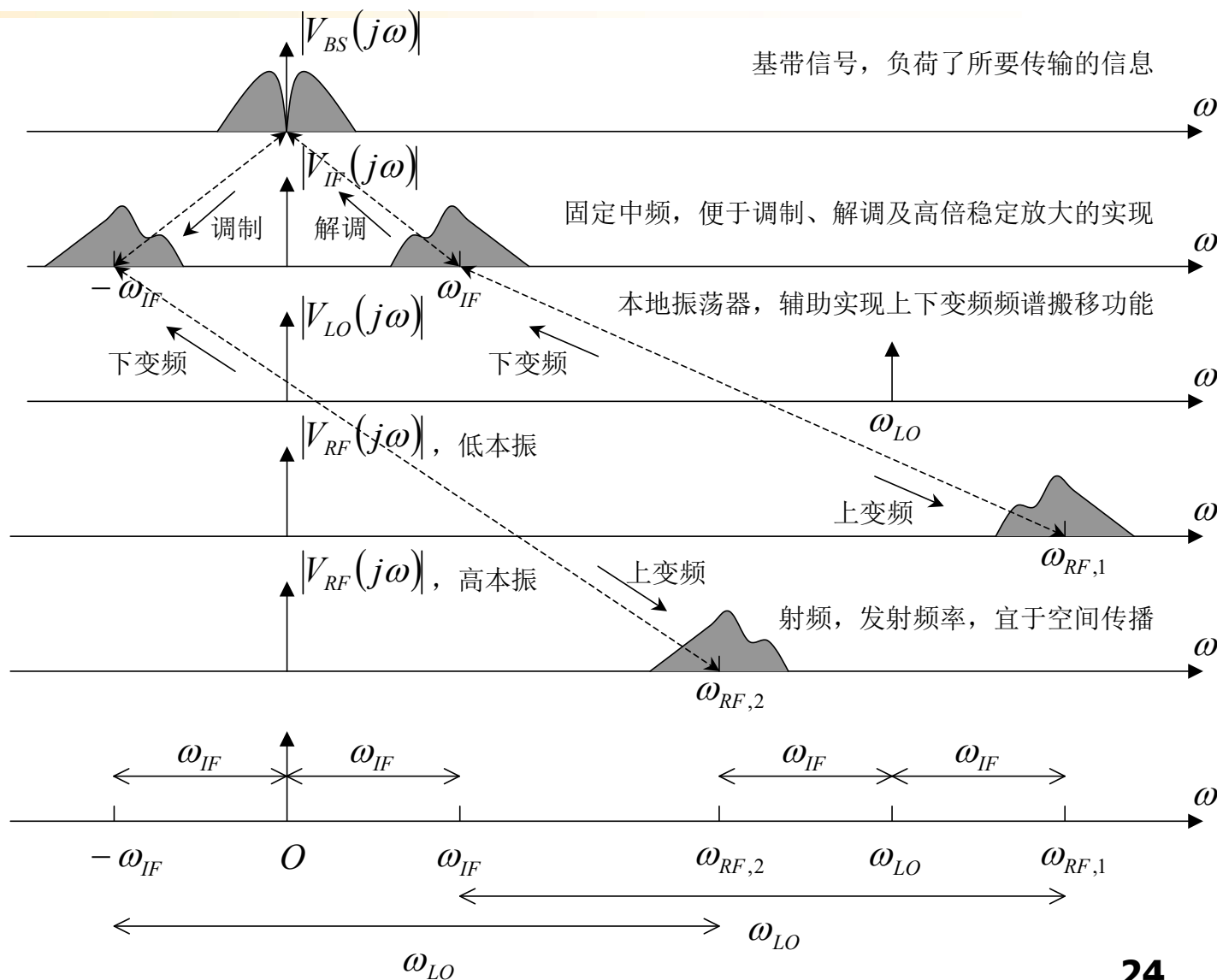


调频波

- **调频方法总体上可分为两大类**
 - **直接调频**
 - 直接使振荡器的频率随调制信号呈线性关系变化
 - 压控振荡器...
 - **间接调频**
 - 先将调制信号积分处理后，再进行调相
 - **直接调频和间接调频各自的特点、出现的问题、如何解决**
- **鉴频电路的工作原理可分为四类**
 - **斜率鉴频、正交鉴频、过零鉴频、锁相鉴频**
 - 各自的特点和优缺点，基本框图，典型电路
- **调制特性、鉴频特性、线性与非线性等问题**

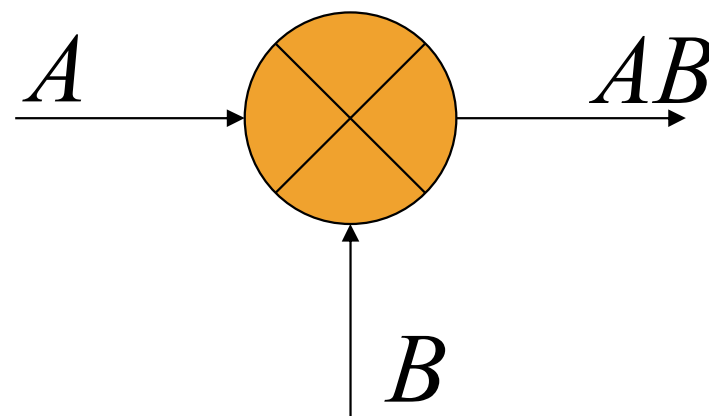
三、上下变频

- 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

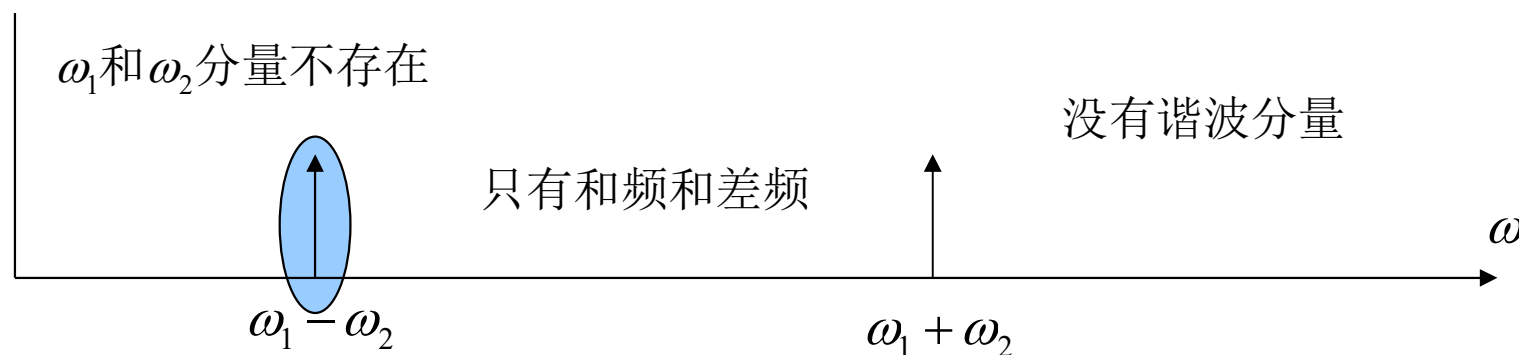


理想变频器

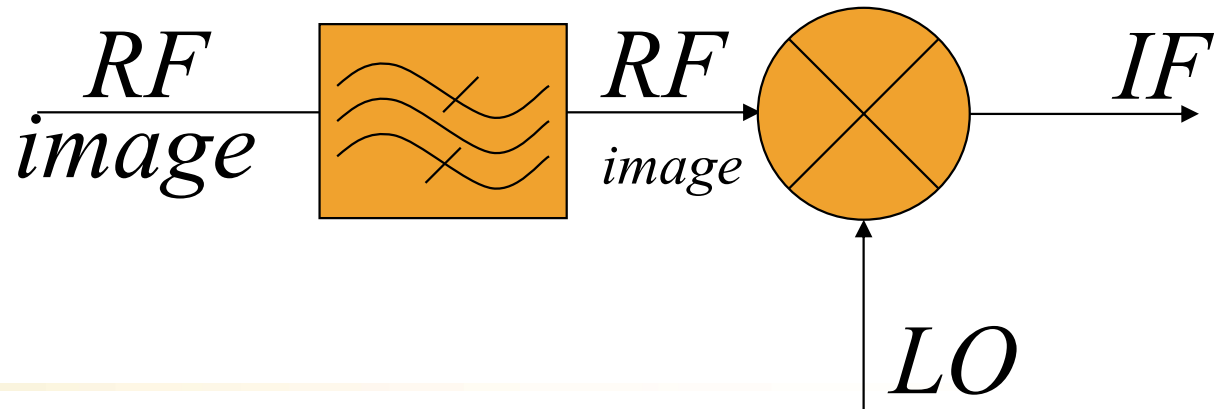
- 变频器实现频谱搬移，实现频率混合，时域上是通过信号相乘实现的



$$(A \sin \omega_1 t)(B \sin \omega_2 t) = \frac{AB}{2} [\cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t]$$

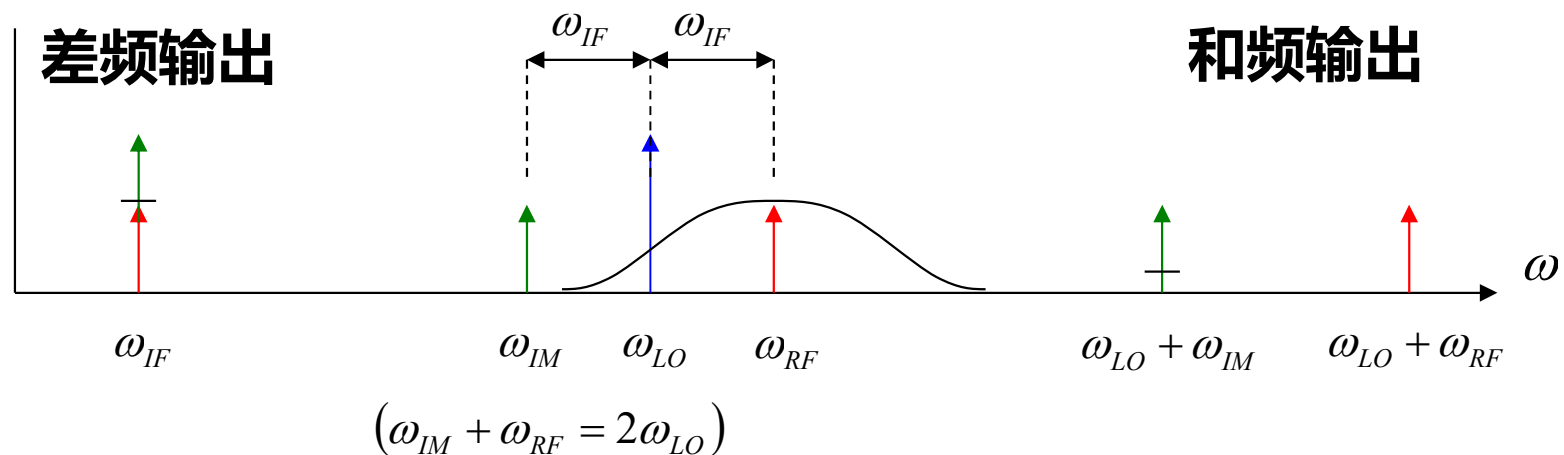


image



镜像干扰

- 两个输入频率（射频频率和镜像频率）都将被变频到中频频率
 - 镜像频率处的信号对有用信号形成干扰
 - 镜像频率处干扰必须被去除
 - 镜像抑制滤波器...



变频的实现方法

- 利用器件非线性特性

- 将本振信号和射频信号相加混合后，做为非线性器件的输入信号，利用非线性器件的二次非线性平方项，获得两个信号的差频或和频

- 简单；杂波多，端口隔离度也很差

- 利用开关（或取样）

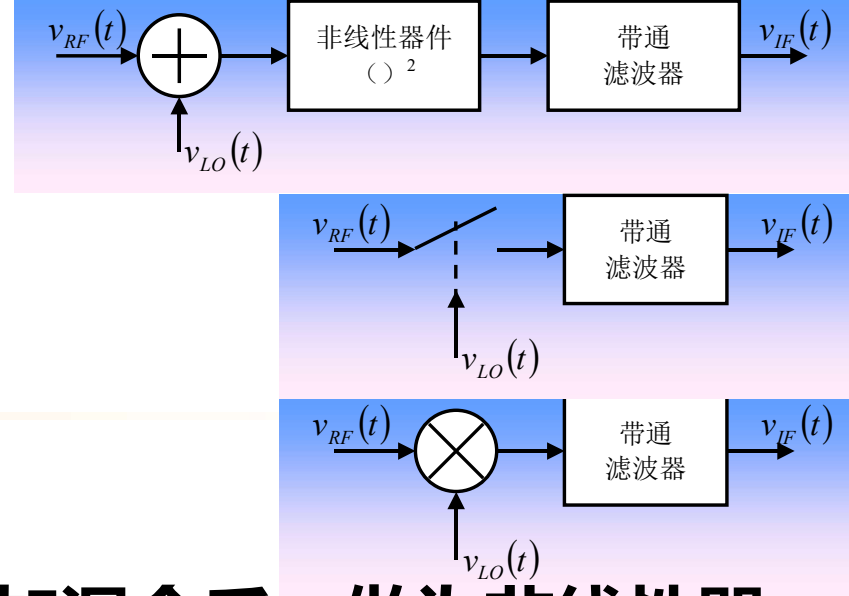
- 时变线性系统

- 优选方案，杂波少

- 利用模拟相乘器

- 理想变频方案

- 实际模拟相乘器噪声大，动态范围小



$$(v_{RF} + v_{LO})^2 = v_{RF}^2 + 2v_{RF}v_{LO} + v_{LO}^2$$

$$(v_s \cos \omega_{RF}) \cdot S(\omega_{LO}t)$$

$$v_{RF}(t) \cdot v_{LO}(t)$$

利用非线性

- 平方律器件
- 一般非线性
 - 只要包含二次项或以上的任意非线性, 都可实现变频
 - 有时本振大信号可以等效为开关信号, 我们更希望用开关实现变频功能

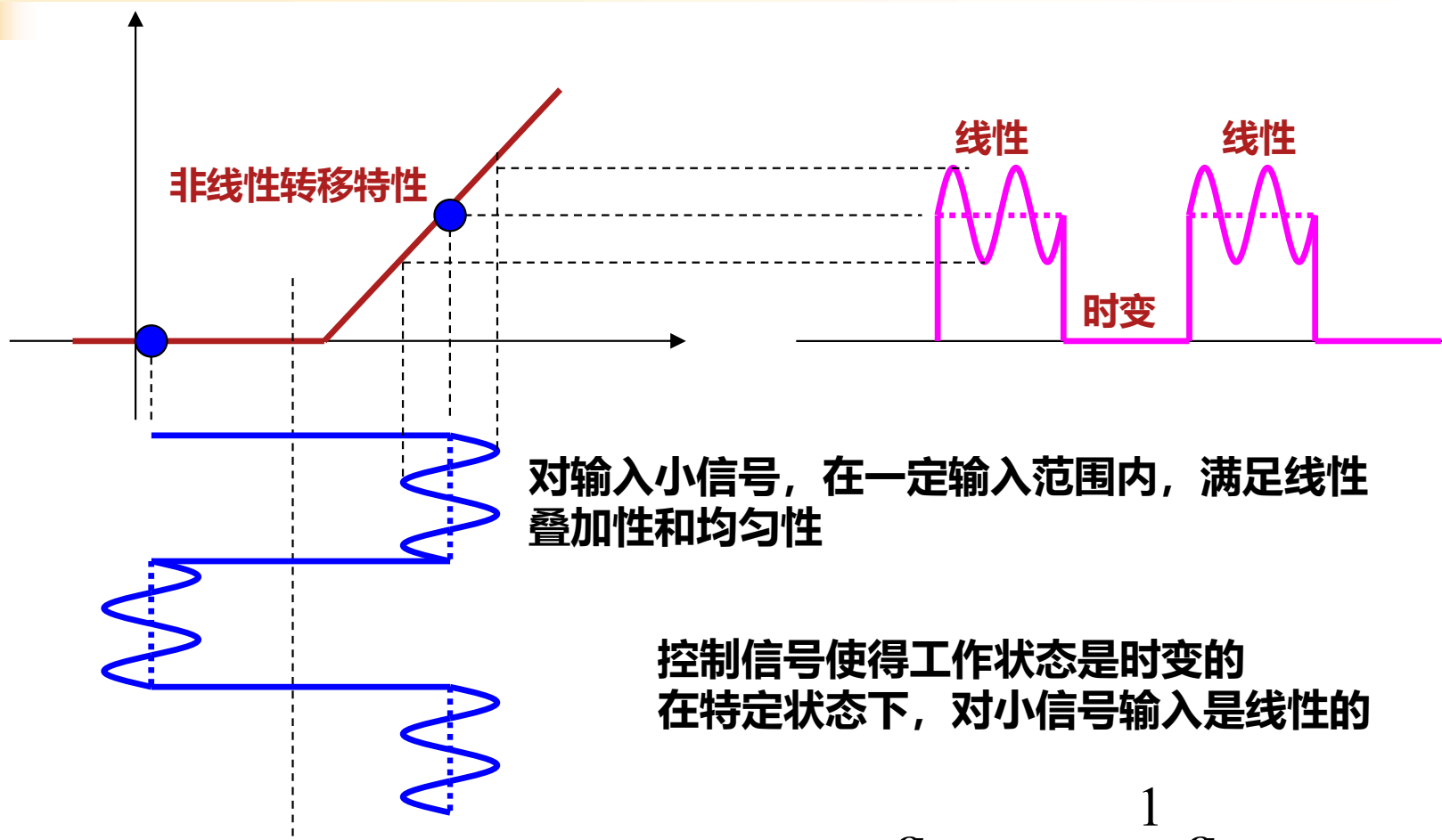
$$(v_{RF} + v_{LO})^2 = v_{RF}^2 + \underline{\underline{2v_{RF}v_{LO}}} + v_{LO}^2$$

$$y = x^3$$

$$y = (V_0 + v)^3 = V_0^3 + 3V_0^2v + \underline{\underline{3V_0v^2}} + v^3$$

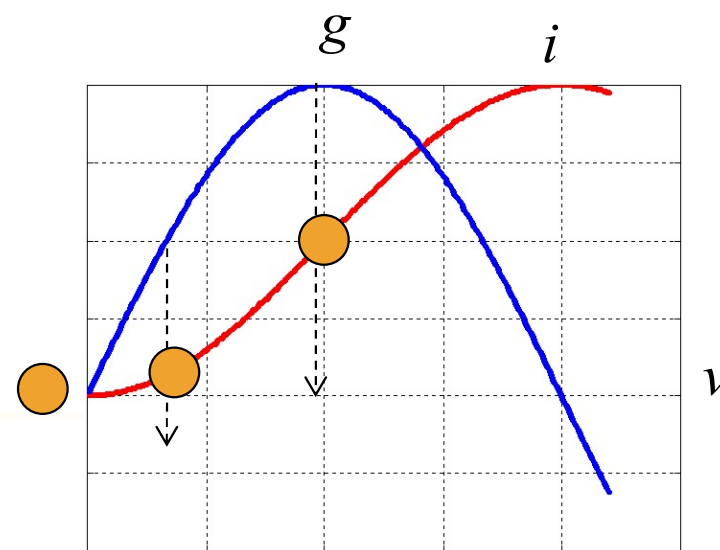
$$g_{\text{变频跨导}} = \frac{1}{\pi} g_{\text{放大跨导}}$$

开关变频：时变性源于非线性



$$g_{\text{变频跨导}} = \frac{1}{\pi} g_{\text{放大跨导}}$$

直流工作点选取



■ 放大器工作点选取

■ 跨导曲线最大值位置

- 跨导增益最大，小信号放大线性度最高（线性范围最宽）

■ 变频器工作点选取

■ 跨导曲线最线性位置（二阶导极大值点）

- 变频跨导增益最大，小信号线性度最高

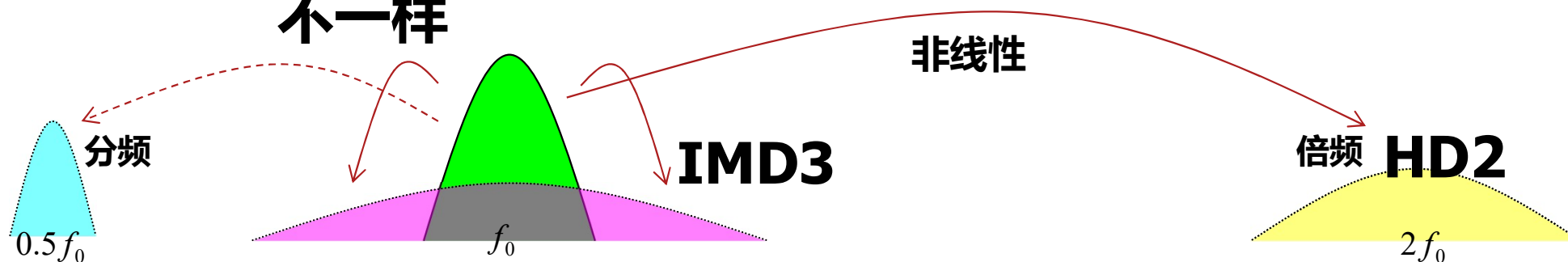
■ 本振大信号时变频器工作点选取

■ 此时本振信号可视为开关信号

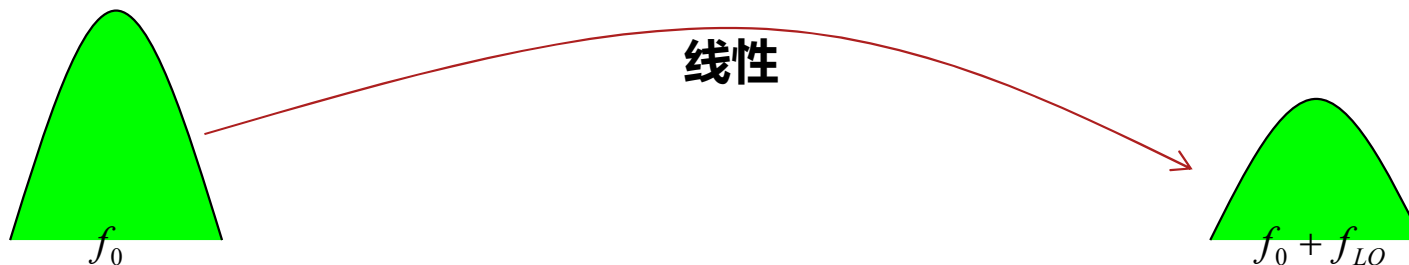
- 工作点选取应使得小信号放大具有最大的线性度，变频增益达到最大值，和本振幅度几乎无关

非线性与时变性

- **非线性：**从输入频谱结构中产生出原频谱结构中不存在的新的频谱分量，新频谱分量的频谱结构和原频谱不一样



- **变频器是时变线性电路：**只是将频谱在频率轴上平移，不改变原频谱结构
 - 算不算产生了新的频率分量？



非线性电路的分析方法

- 小信号分析方法
 - 局部线性法：交直流分析法，小信号放大器
 - 幂级数法：信号不是很小，非线性电路实现的变频器
- 大信号分析方法
 - 分段线性法：开关变频、功率放大器、张弛振荡器、包络检波
 - 准线性法：正弦波振荡器
- 非线性影响与描述
 - 非线性对基波的影响
 - 功率压缩 (P_{1dB})
 - 非线性产生新频率分量
 - 谐波(THD)
 - IMD3(IIP3)
 - ...

$$\omega < \omega_{\max} \Rightarrow g_m > g_{m0} + \alpha \cdot \omega^2 + \dots$$

$$g_m = \frac{I_C}{v_T}$$

$$g_m = \frac{I_D}{0.5(V_{GS} - V_{TH})}$$

四、放大、振荡与有源性

- 为何可实现功率放大?为何可实现振荡?
- 有源性
 - 有源性确保可实现功率放大,实现振荡
- 什么是有源性
 - 网络可向外提供功率!具有向端口外提供功率的能力!
 - 网络端口阻抗在某种条件下可等效为负阻, ...
- 为何具有有源性?
 - 有源器件/负阻器件具有将直流功率转换为交流功率的能力



线性与非线性

- **放大或振荡,如果是小信号,则处于线性工作状态,如果是大信号,则处于非线性工作状态**
 - **放大器:小信号放大器是线性放大器,大信号放大器是非线性放大器**
- **振荡器:起振阶段是线性的,平衡和稳定阶段是非线性的**
 - **非线性限制了振荡器的振荡幅度**



线性网络的匹配

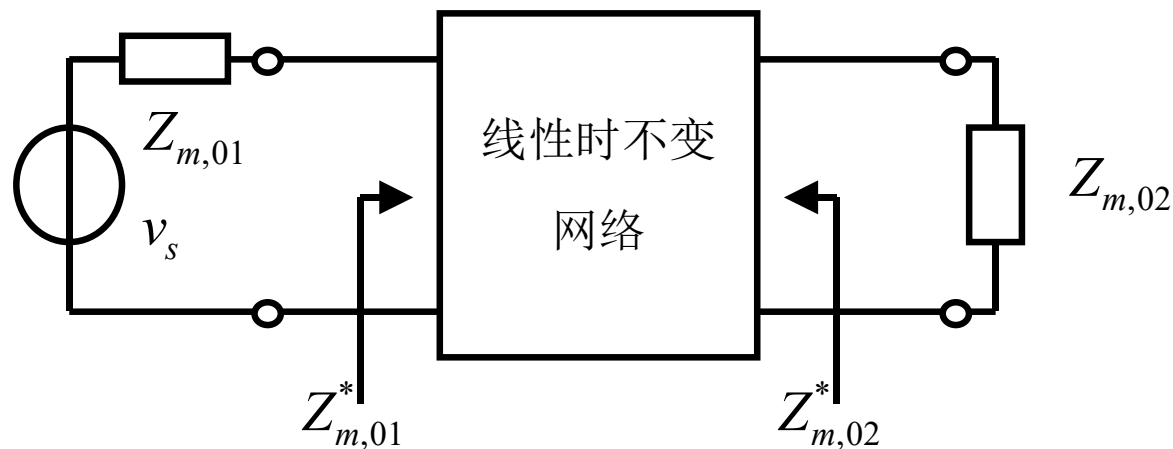
- 共轭匹配

- 如果网络端接**共轭匹配阻抗**,没有功率反射,可实现最大功率传输,网络的功率增益最大

- 单向传输匹配

- 以传输线网络为例, 如果网络端接**特征阻抗**,可实现单向传输匹配,网络端口没有电压反射和电流反射

双端共轭匹配



双端同时共轭匹配，可实现最大功率传输

$$H_p = \frac{P_{R_{m,02}}}{P_{S,\max}} = \frac{\frac{1}{2} |i_{m,02}|^2 R_{m,02}}{\frac{1}{8} \frac{|v_s|^2}{R_{m,01}}} \text{ 对功率传输而言是最大的}$$

MAG

Maximum Available Gain

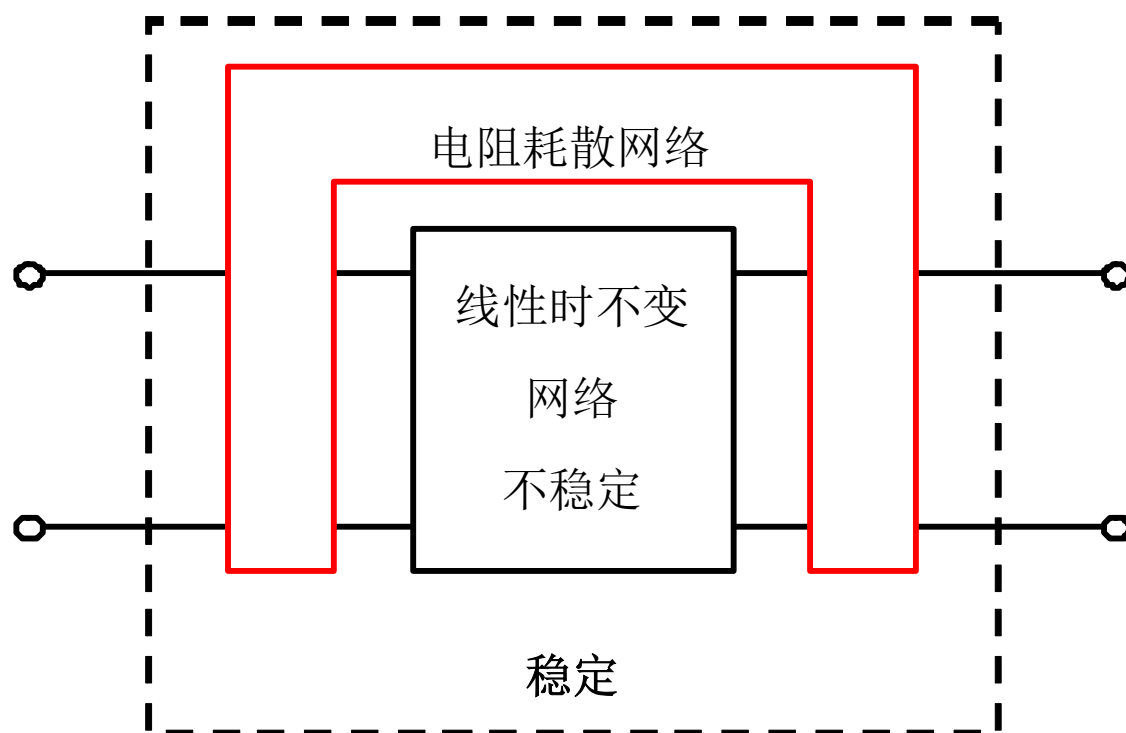


稳定与不稳定

- 对二端口网络而言，其端接负载随意变化时,从另一端口看入的阻抗为正阻特性,则为绝对稳定,绝对稳定区存在共轭匹配阻抗
- 无源电路一定是绝对稳定的
- 有源电路可能是不稳定的
- 放大器出现不稳定（振荡），往往是有内在的正反馈导致负阻振荡

如何稳定?

- 不追求最大功率增益
 - 负载不要求共轭匹配
- 增加耗散
 - 加入电阻, 抵消负阻, 使得端口阻抗呈现正阻, 实现绝对稳定
- 破坏振荡条件





匹配网络

- 用无损网络做匹配网络
 - 理想变压器
 - 理想回旋器
- LC匹配网络
 - L型、T型、 Π 型
 - 二端口电感、二端口电容
 - 部分接入
- 传输线匹配网络

4.2 放大

小信号高频放大器

■ 基本模型

- 至少能够将晶体管等效为一个跨导器：这是放大器能够实现放大的根本原因，有源性的主要体现

■ 关键因素

- 在射频频段，对晶体管性能影响最大的就是跨接在输出回路和输入回路之间的耦合器件
- 对于共源组态， C_{gd} 的影响极大
 - C_{gd} ：输出和输入之间的耦合器件，输出到输入的反馈通路，在某种负载条件下可成为正反馈通路，因而是放大器不稳定性的基本要素，它可以将器件有源性变换为负阻不稳定性
 - Miller效应，对输出回路和输入回路都有很大影响



大信号放大

C类要求:理解折线法
DEF理解概念即可

- **利用晶体管的非线性转移特性实现高效率放大**
- **提高效率的根本在于降低晶体管自身的功率消耗**
 - **C类放大器通过降低导通角,使得晶体管同时有电流电压的时间段在一个周期内占比降低**
 - **D/E/F类放大器则通过将晶体管驱动为开关状态,使得晶体管管耗尽可能小**

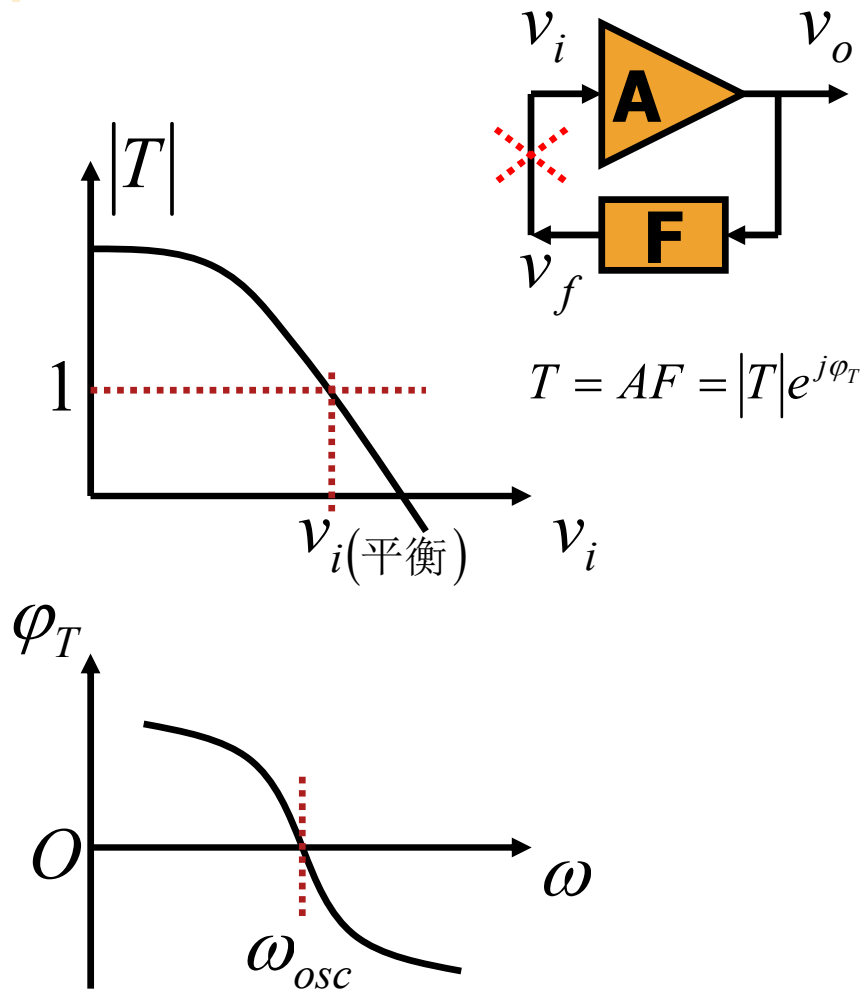


4.3 振荡

- **振荡器是一种不需外加信号激励就能自动将直流能量变换为周期性交变能量的装置**
- **振荡器正常工作，必须有以下三个部分**
 - **电源**：为振荡器提供直流能量
 - **带有正反馈通路的放大器或负阻器件**：至少有一个有能量变换作用的有源器件，如负阻器件和带正反馈通路的放大器（也可等效为负阻器件），以补充器件的能量损耗，来保证有稳定的振荡输出
 - **频率决定元件或回路**：振荡器必须有频率决定器件或回路，如由电阻、电容、电感、和晶体等构成的谐振选频网络、移相选频网络、或延时选频网络

准线性分析

反馈振荡器的振荡条件



要求会估算：
振荡频率为谐振频率
振荡幅度为非线性限制

起振条件： $|T| > 1, \quad \varphi_T = 2n\pi$

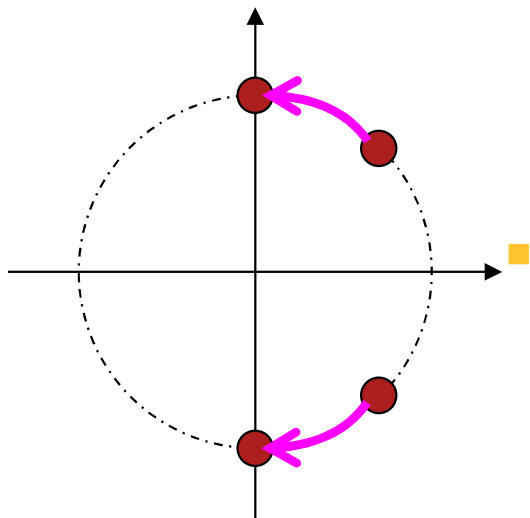
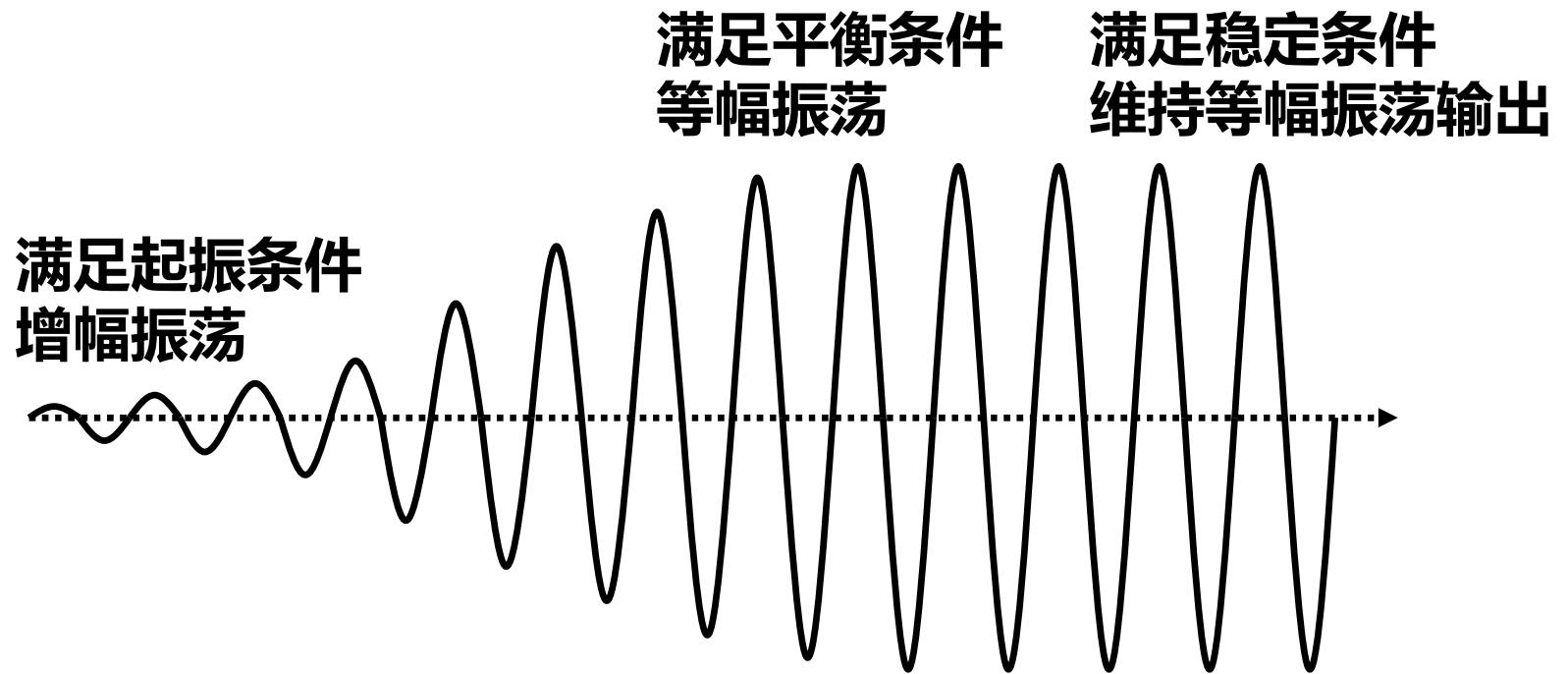
平衡条件： $|T| = 1, \quad \varphi_T = 2n\pi$

稳定条件：

$$\left. \frac{\partial |T|}{\partial v_i} \right|_{v_i(\text{平衡})} < 0,$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_T}{\partial \omega} \right|_{\omega_{osc}} < 0$$

从起振增幅振荡到稳定振荡输出



■ 至少两个极点：至少两个积分器（虚轴上的共扼复数极点）

- $L + C$: LC谐振结构
- $C + C$: 两个理想积分结构
- $C + C + C$: 三个RC移相结构
- ...

**重点：交流等效电路，各元件的作用，振荡频率计算，晶体等效电路及其计算
晶体串联谐振、并联谐振等效阻抗的作用，部分接入的应用**

正弦波振荡的必要振荡条件

■ 必要条件

■ 正反馈或负阻.....有换能器件

- 不满足，一定不能振荡
- 满足，则可能振荡，是否真的可以振荡，还需进一步的小信号起振条件和稳定条件分析

■ 能够产生两个极点.....有频率选择

- LC谐振电路，积分电路，移相电路

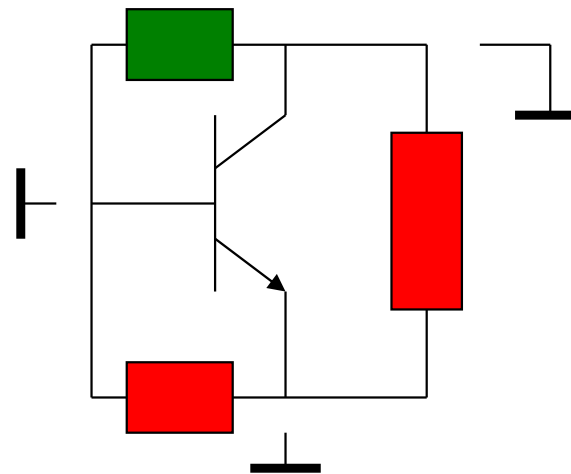
双极点条件（频率决定条件） + 正反馈条件(负阻条件)

- **LC谐振回路**
 - L C 分别起到两个积分器作用
 - LC振荡：必须有负阻补充能量：负阻元件，正反馈放大器
- **三点式**
 - 本质上是LC谐振腔
 - 三点式结构保证晶体管是正反馈，从而提供负阻补偿正阻损耗
- **移相式**
 - 三个RC移相，双积分器移相：选频
 - 已经有180度移相，再加一个反相器，则正反馈

重点

三点式振荡器

- 正反馈条件：
负阻条件：
 - 与发射极相联的两个电抗元件必须是同性质的，另一个是异性





晶体振荡器

- **晶体作用**
 - **电感：并联型**
 - **短路线：串联型**
- **泛音振荡实现**
- **晶体是一个复杂谐振结构，充分理解复杂谐振结构中的串联谐振和并联谐振**



五、滤波

- 滤波机制在射频通信系统中无处不在
- 射频带通滤波器难以集成,是现代射频通信系统单片集成的主要障碍
 - 正交结构避免射频带通滤波器集成
- 滤波器设计理论十分完善, 滤波器设计公式推导不做任何要求, 但对滤波概念要全面掌握
- 我们重点要求对谐振回路的理解
 - **谐振回路**是射频电路的基本特征电路

LC并联谐振回路的应用贯穿于整个系统，是重点中的重点

重点：LC并联谐振回路的性质，应用总结？

谐振回路是窄带射频电路的特征

- LC串并联谐振回路的基本特性 基本要求
 - 中心频率、品质因数、3dB带宽、选频特性（幅频特性、相频特性），阻抗变换关系，电压/电流谐振，相关计算
 - 如何实现低通、高通、带通、带阻特性
- 在谐振回路基础上的能量耦合方法
 - 变压器部分接入：通过变压器耦合：：双谐振回路
 - 至少掌握全耦合变压器计算
 - 电容、电感部分接入：通过分压网络耦合
 - 相关阻抗变换计算

用滤波器中心频点的群延时表示Q值 $\tau_g(\omega_0) = \frac{2Q}{\omega_0}$

Q值/带宽/响应速度

$$BW_{3dB} = \frac{f_0}{Q}$$

$$\tau_g = -\left. \frac{d\varphi}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{2Q}{\omega_0} = \frac{Q}{\pi f_0}$$

$$BW_{3dB} \cdot \tau_g = \frac{1}{\pi}$$

- 滤波器带宽越窄,响应速度越慢
- 滤波器Q值越高,滤波器幅频特性越陡峭,过渡带越窄,实现难度越大,实现成本越高
 - 对器件本身的Q值要求高: 固体谐振腔
 - 需要高阶实现:

重点：一阶PLL相关计算，二阶环基本概念、基于相位模型的理论推导，**PLL应用**

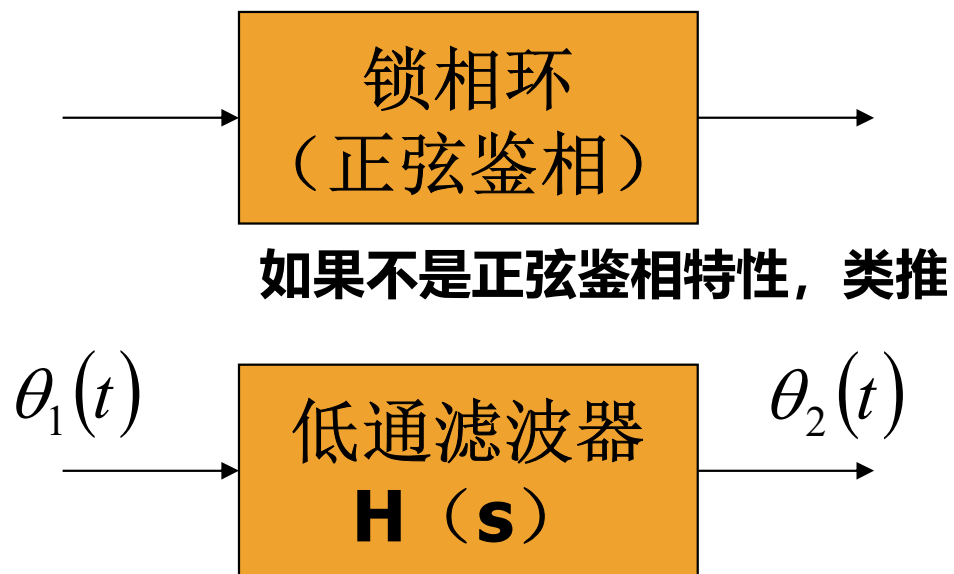
六、反馈控制系统

- AGC
 - 理解即可
- AFC
 - 与PLL类同
- PLL
 - 原理、组成
 - 环路方程
 - 线性特性（跟踪特性、**频率特性**）、非线性特性（**同步带、捕捉带、一阶环相图**），相关计算
 - 稳态相差、**3dB带宽**、相位的频率响应、同步带、...
 - **PLL的应用**:现代接收机基本离不开PLL
 - PLL在不同系统应用中到底起什么作用？

锁相环

$$v_i(t) = V_{IM} \sin(\omega_{i0}t + \theta_1(t))$$

$$v_o(t) = V_{OM} \cos(\omega_{i0}t - \varphi_{e\infty} + \theta_2(t))$$



$$\varphi_{e\infty} = \arcsin \frac{\omega_{i0} - \omega_{o0}}{K_p A_{F0}}$$

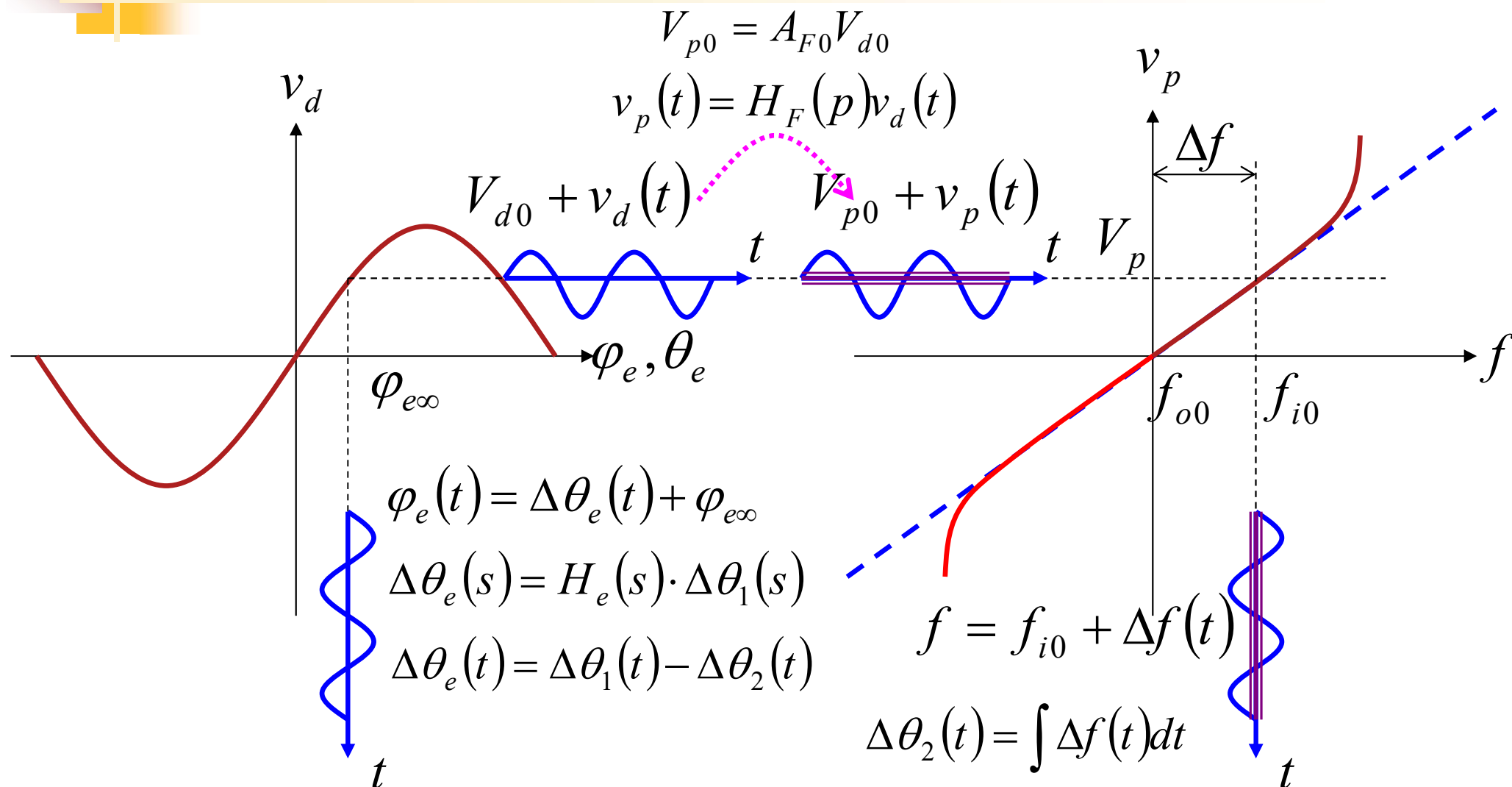
$$\theta_2(t) = H(p) \cdot \theta_1(t)$$

传递函数具有低通特性
误差传递函数具有高通特性

$$v_i(t) = V_{IM} \sin(\omega_{i0}t + \theta_1(t))$$

$$v_o(t) = V_{OM} \cos(\omega_{i0}t - \varphi_{e\infty} + \theta_2(t))$$

稳态相差确保输出频率等于输入频率





七、总结

■ 把教材和课件捋顺

- 整本教材就是在讲发射机和接收机方案及电路的实现
 - 超外差结构是基本要求
- 对概念、电路功能的理解上要下功夫
 - 概念如果清楚，就没有难题
- 电路，子系统，系统如何实现某种功能的？
- 将网络学堂提供的3年考题自己做一遍，体会参考答案，确认自己的问题在哪里？可以有针对性进行复习
 - 内容有所调整，考试内容也会相应变化



期末考试

- **具体时间和地点待定**
- **要求：隔行隔列，带学生证，带计算器**
 - 可带一张A4公式纸
 - 考试结束铃响后，一定要等监考老师数卷子确认后再离场
- **作业**
 - 补交作业应在15周前全部提交到助教处

- 
- **谢谢同学们一学期以来的支持!**