



电子科技大学

University of Electronic Science and Technology of China

2024年全国大学生电子设计竞赛 赛区赛题目交流

C题：无线传输信号 模拟系统



电子科技大学：李玉柏
ybli@uestc.edu.cn

主要内容

- 命题背景说明
- 题目内容解读
- 知识点说明
- 作品开发的注意事项





1、命题背景说明

- 命题范围（2019年—）：
 - ✓ 以电子电路（含模拟和数字电路）设计应用为基础，可以涉及模-数混合电路、单片机、嵌入式系统、DSP、可编程器件、EDA软件、互联网+、大数据、人工智能、超高频及光学红外器件等的应用。
 - ✓ 题目设计内容包括“理论设计”和“实际制作与调试”两部分。
 - ✓ 竞赛题目应具有实际意义和应用背景，并考虑到目前教学基本内容和新技术应用趋势。



1、命题背景说明

- 根据2019年命题要求，结合以前十多届全国电子设计竞赛的命题情况，将题目类型分成：
 - ✓ 基本电路类：包括基本的功能电路，特别是电源电路的设计；
 - ✓ 通信网络技术类：包括通信、网络原理与系统的设计，以及基于通信与网络的应用设计；
 - ✓ 自动测量与仪器仪表类：包括各种特殊传感器应用设计、仪器仪表设计；
 - ✓ 智能控制类：包括自动控制、人工智能应用与智能机器设计等。



2、C题：无线传输信号模拟系统

无线传输信号模拟系统（C 题）

【本科组】

一、任务

设计制作用于模拟产生无线传输信号的系统，包括模拟产生直达传输信号和多径传输信号，并合路得到模拟的无线传输信号。其中，直达信号的初相、幅值可设置，多径信号相对直达信号的时延、初相和幅值衰减可设置。系统的组成框图如图 1 所示。模拟产生的直达信号 S_D 、多径信号 S_M ，以及合路的输出信号 S_{Out} 都需要留出测试端口，以便进行测试。

2、C题：无线传输信号模拟系统

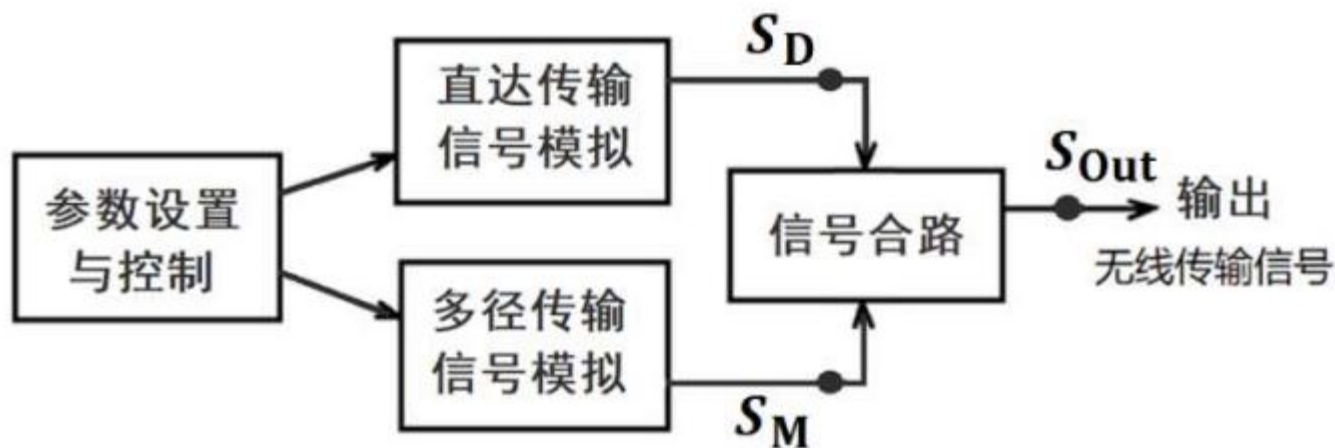


图 1 无线传输信号模拟系统框图



2、C题：无线传输信号模拟系统

二、要求

(1) 模拟产生一个固定载波频率的无线传输信号，载波频率 f_c 介于 30MHz ~ 40MHz 之间，其中直达传输信号 S_D 和多径传输信号 S_M 满足以下要求：

- 1) 可设置无线传输信号为连续波 (CW) 信号或调幅 (AM) 信号。对于 AM 信号，其调制信号为 2MHz 频率的正弦信号。(10 分)
- 2) 模拟产生直达传输信号 S_D ，载波幅度有效值可设置，有效值范围为 100mV ~ 1V，以 100mV 的步进可调，要求幅度有效值误差不大于 10mV；对于 AM 信号，其 AM 调制度可设置，调制度范围为 30%~90%，以 10%的步进可调，误差不大于 5%。(20 分)
- 3) 模拟产生的多径传输信号 S_M ，其幅度衰减和时延可设置。相对直达信号，多径信号的时延范围为 50 ~ 200 ns，以 30ns 的步距步进可调，要求时延误差不大于 10ns；幅度的衰减范围为 0 ~ 20 dB，以 2 dB 的步进可调，要求衰减误差不大于 1dB。(20 分)



2、C题：无线传输信号模拟系统

(2) 模拟产生载波频率覆盖 30 ~ 40MHz 波段的无线传输信号，载波频率 f_c 以 1MHz 为步进可设置，其中直达传输信号 S_D 和多径传输信号 S_M 满足以下要求：

- 1) 模拟产生直达传输信号 S_D ，在 30MHz ~ 40MHz 范围内设置载波频率，要求 频率误差不大于 2%；其他可设置参数满足 (1) 中 1) 和 2) 的指标要求。(16 分)
- 2) 模拟产生多径传输信号 S_M ，相对直达信号 S_D 的 初始相位可设置，设置范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，以 30° 的步进可调，要求初始相位误差不大于 10° ；其他可设置参数满足 (1) 中 3) 的指标要求。(20 分)

(3) 在频段 30MHz ~ 40MHz 内合路输出无线传输信号 S_{Out} ，要求合路输出 信号正确，波形稳定。(8 分)

(4) 其他。(6 分)

(5) 设计报告。(20 分)

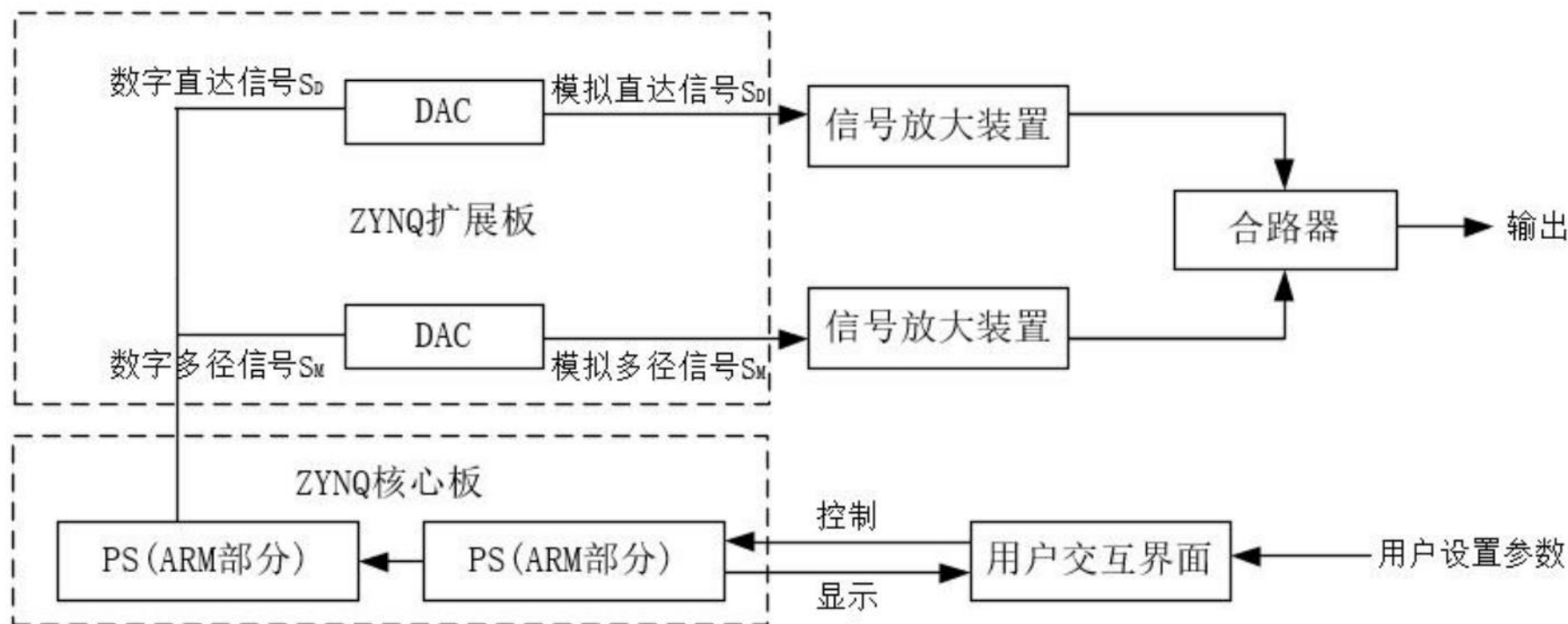


2、C题：无线传输信号模拟系统

- 典型的设计方案可以分为：
 - **FPGA方案**：基本上都是采用Xilinx的ZYNQ平台，然后加上双路高速DAC扩展板来实现。（有个别方案将AM调制使用了自己设计的乘法器）；
 - **DDS芯片**：基本上都是采用AD9959来实现，利用其四通道高速DDS完成直达信号、多径信号的**载波、调制信号的生成**，然后在外加模拟电路进行滤波、AM调制、放大以及合路处理；
 - **模拟射频方案**：采用PLL产生载波信号，分别设计直达信号和多径信号的射频电路（包括调制、滤波、放大），然后进行合路。（模拟方案中为了检测两路信号相位关系，一般还设计有鉴相电路）

2、C题：无线传输信号模拟系统

- 下面给出一个作品的例子（基于FPGA）



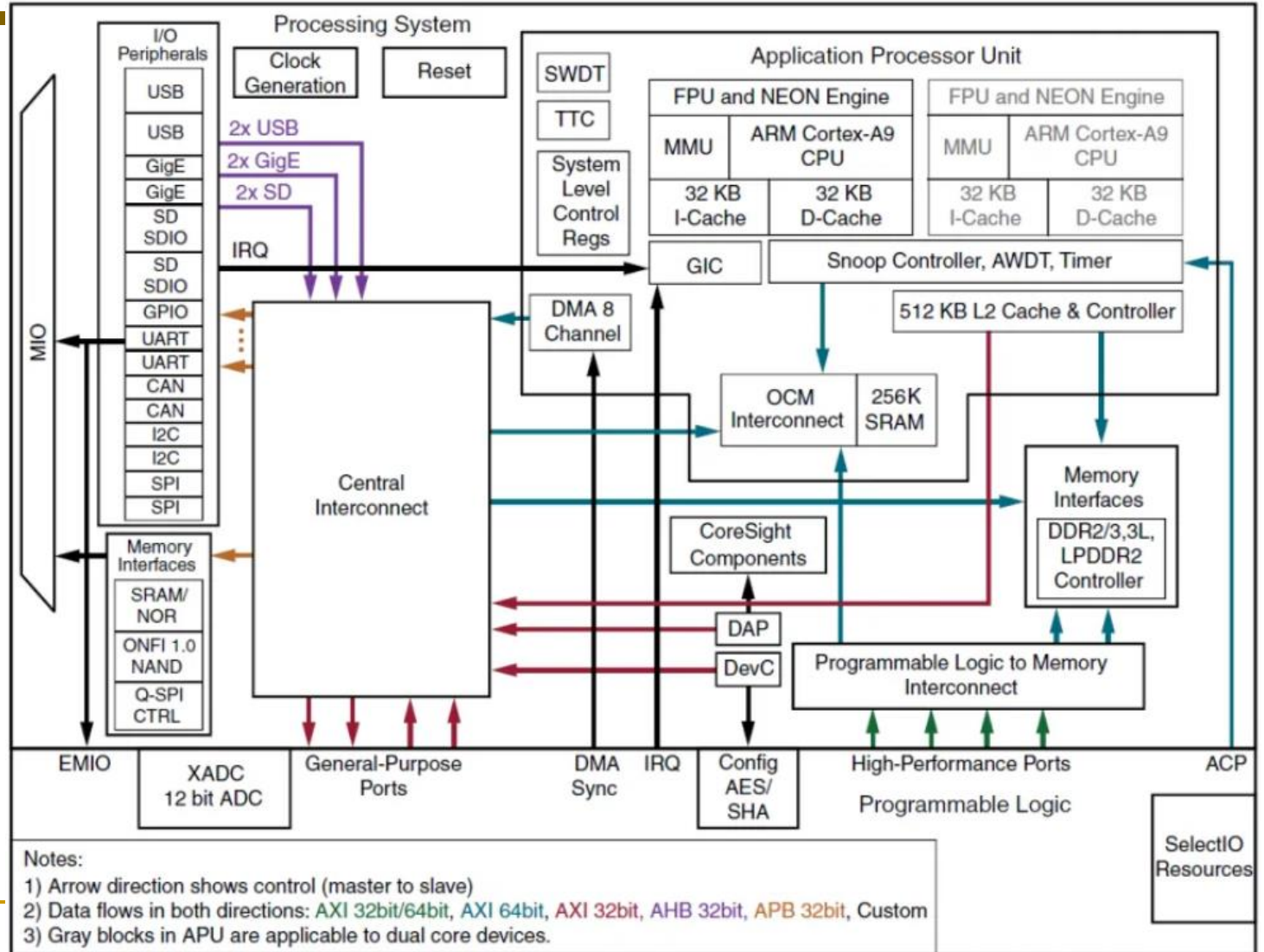


2、C题：无线传输信号模拟系统

- ZYNQ是新一代全可编程片上系统 (APSoC)，分为ARM和FPGA两部分：PS (Processing System) 就是ARM的SOC部分；PL (Programmable Logic) 为可编程逻辑，也就是ZYNQ上的FPGA部分。
 - 对于ZYNQ-7000系列的APU (Application Processor Unit) 应用处理器单元，是一个强大的处理系统，包含了双ARM-CortexA9核，再加上高速缓冲，DMA，定时器，中断控制，浮点和NEON协处理。
 - 开发板提供了**多功能IO引脚MIO** (Multiuse I/O)用于扩展外设，纯属于ARM部分，对PL部分是不可见的。
 - 另外，提供了**可拓展多功能IO引脚EMIO** (Extendable Multiuse I/O)，也是属于PS部分，但连接到了PL上，再从PL的引脚连到芯片外面实现数据输入输出。

2、C题：无线传输信号模拟系统

ZYNQ-7000 Soc 结构图



Zynq-7000 SoC 内部结构图



2、C题：无线传输信号模拟系统

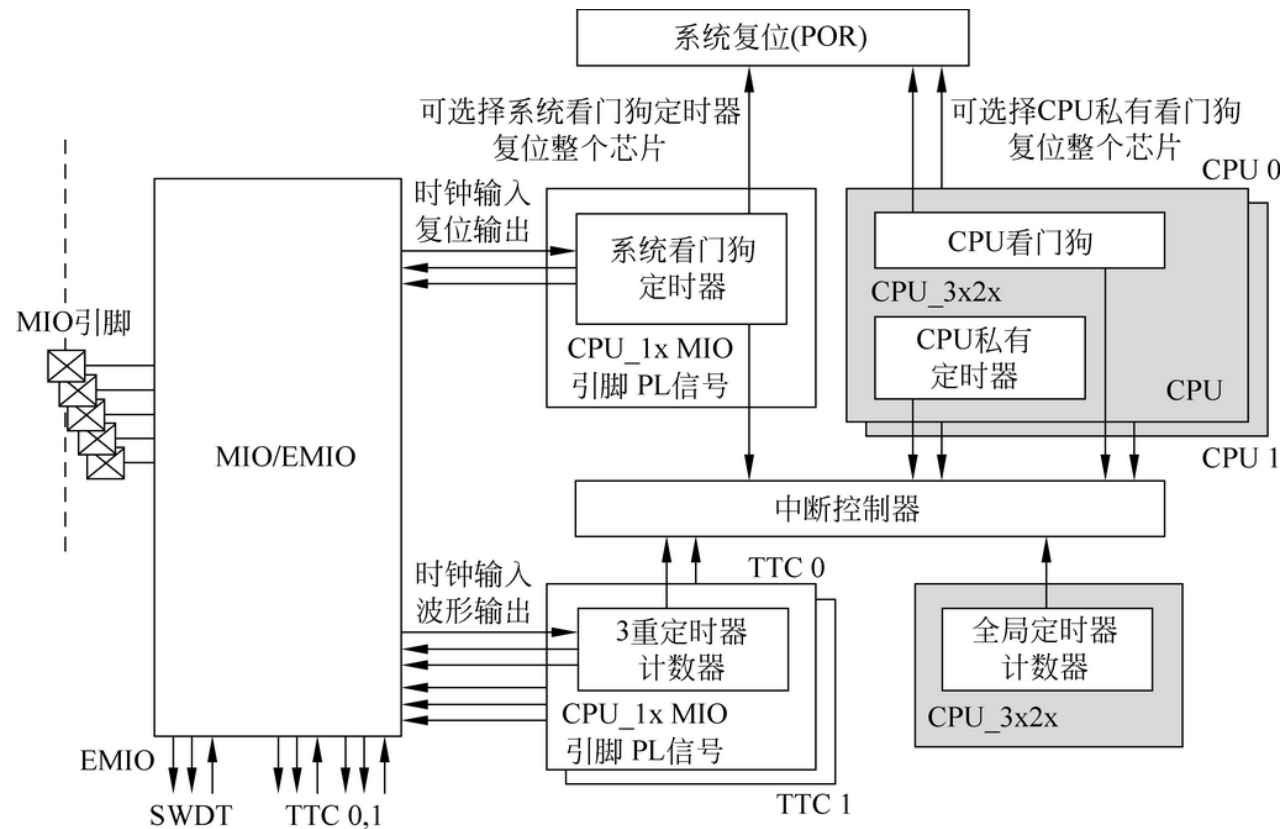
- ZYNQ 芯片内部用硬件实现了先进扩展总线 AXI（Advanced eXtensible Interface）接口协议，包括 9 个物理接口，分别为 AXI-GP0~AXIGP3，AXI-HP0~AXI-HP3，AXI-ACP 接口：
 - AXI_ACP 接口，是 ARM 多核架构下定义的一种一致性端口，用来管理 DMA 类的不带缓存的 AXI 外设，PS 端是 Slave 接口；
 - AXI_HP 接口，是高性能/带宽的 AXI3.0 标准的接口，PL 模块为主设备连接。主要用于 PL 访问 PS 上的存储器（DDR 和 On-Chip RAM）；
 - AXI_GP 接口，是通用的 AXI 接口，总共有四个，包括两个 32 位主设备接口和两个 32 位从设备接口。

2、C题：无线传输信号模拟系统

- TTC: (Triple Time Counter), 三倍时间计数器, 其实是这个计数器内有3个独立通道, 可以独立计数;

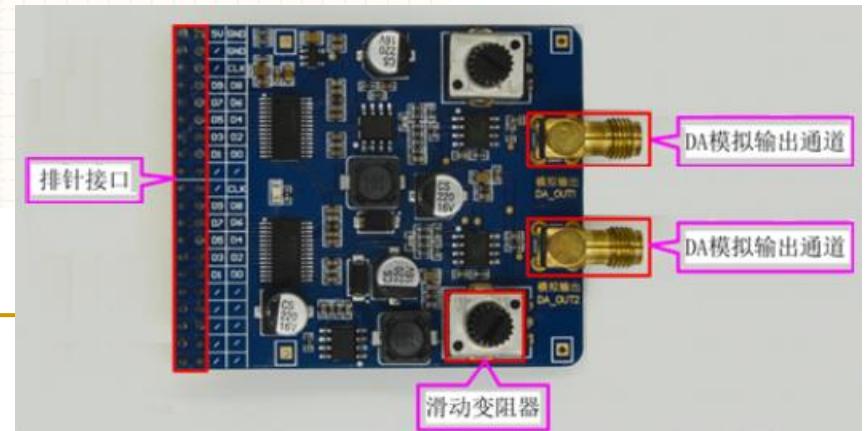
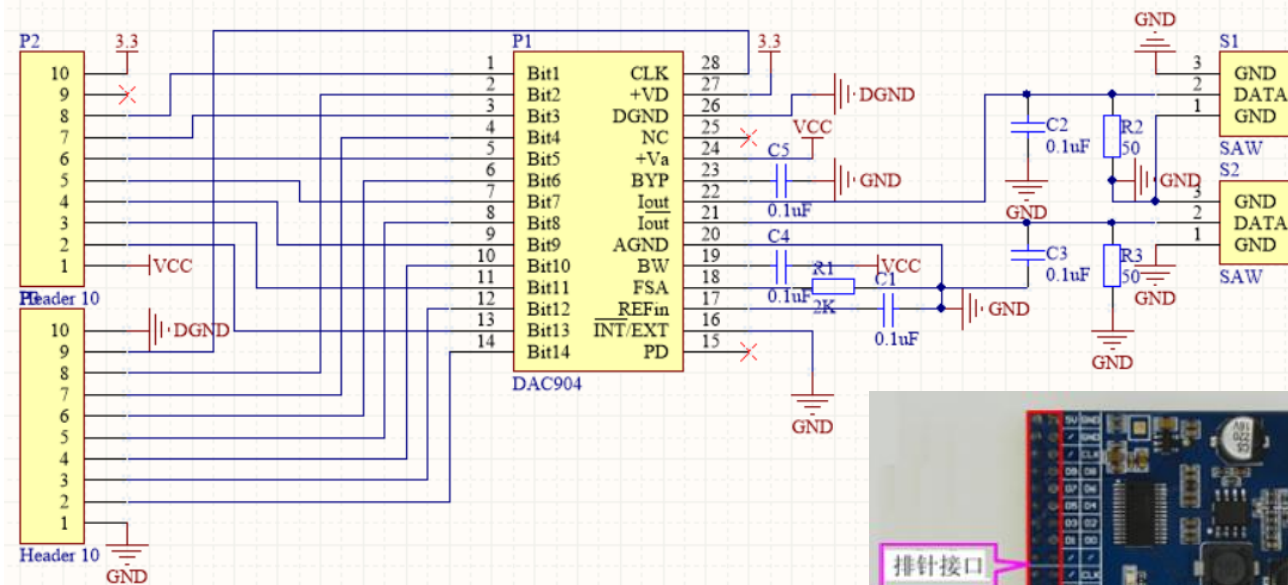
- WDT: 看门狗定时器, 监视ARM-Cortex A9用的;

- SWDT: 系统级看门狗定时器, 这个看门狗的时钟和复位信号, 都可以来自于芯片外部。



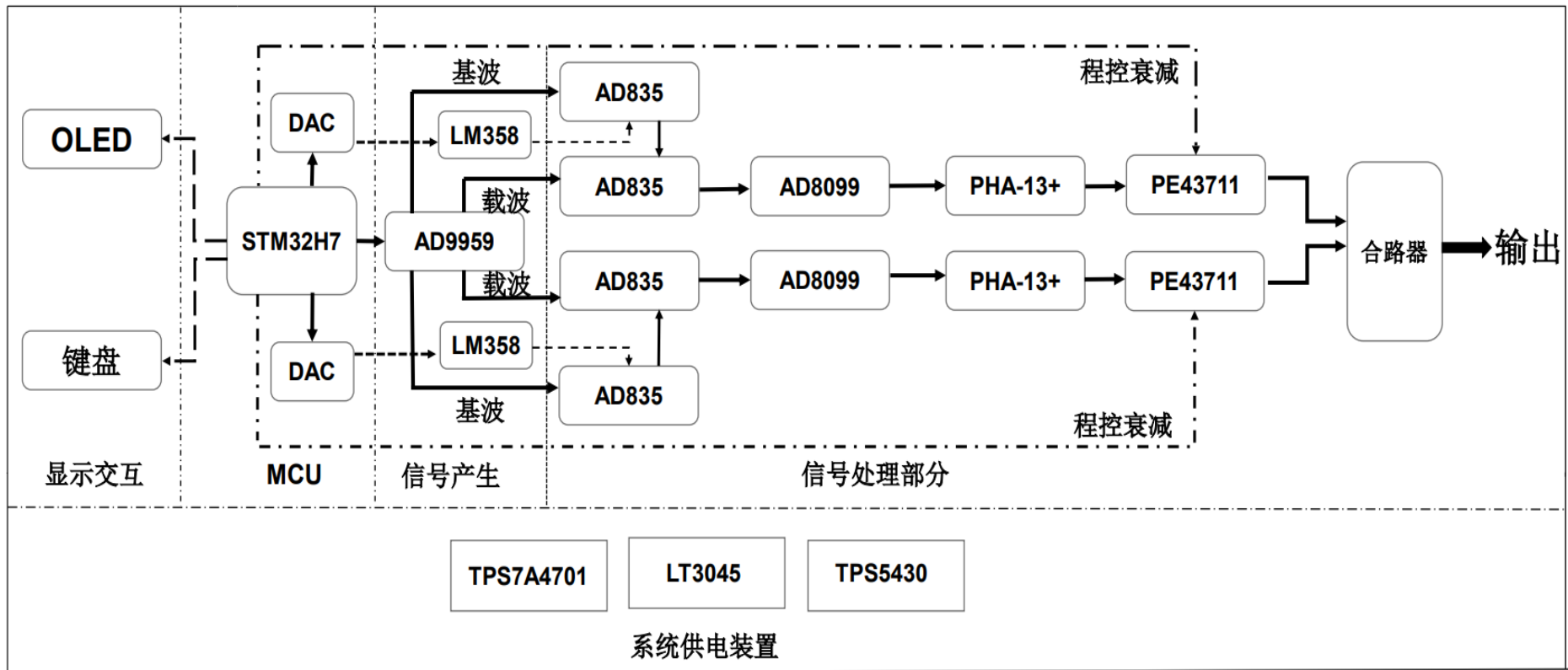
2、C题：无线传输信号模拟系统

- 本题目需要扩展外设-DAC：基于FPGA产生的直达信号和多径信号，需要经过高速DAC转换成模拟信号，有直接使用DAC扩展板 (FMC板卡)，也有使用高速DAC芯片直接转换的，比如使用DAC904。**



2、C题：无线传输信号模拟系统

- 更多地是采用DDS方案，下面给出一个作品的例子



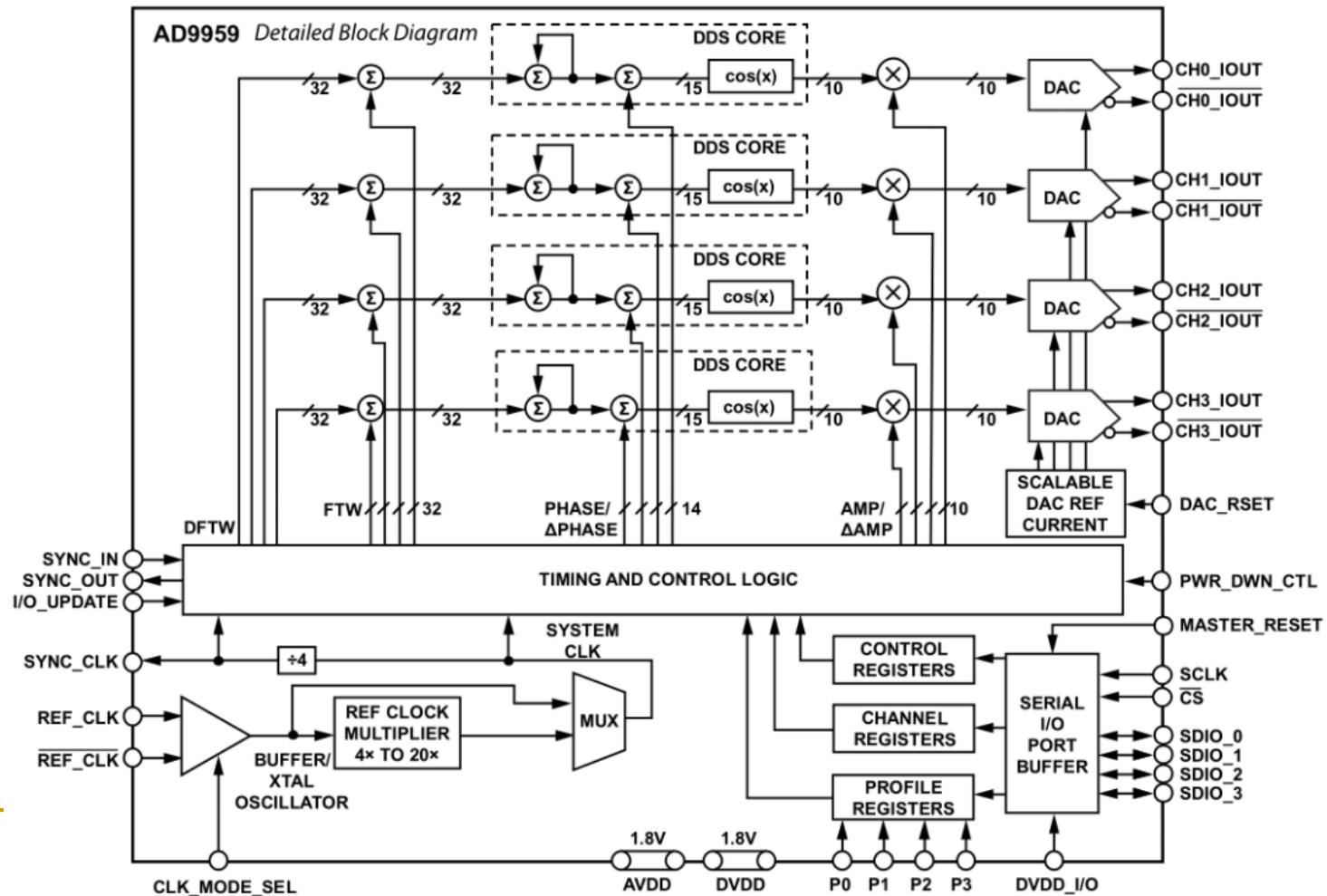


2、C题：无线传输信号模拟系统

- AD9959是一款数字频率合成器，能够输出四路频率、相位和幅度独立可调的正弦波，相当于该芯片内部由4个直接频率合成器（500 MSPS的DDS）构成内核；
- 可以通过合理的寄存器设置，输出高达16阶的FSK、PSK、ASK调制波形和线性扫频、扫相、扫幅信号，最高输出频率能达200M。
 - 四通道DDS，通道间独立的频率/相位/幅度控制，通道间有较好的隔离度 (>65 dB)；
 - 4个集成式10位数模转换器(DAC)；
 - 频率调谐分辨率：0.12 Hz或以上；
 - 14位相位偏移分辨率；
 - 10位输出幅度调整分辨率。

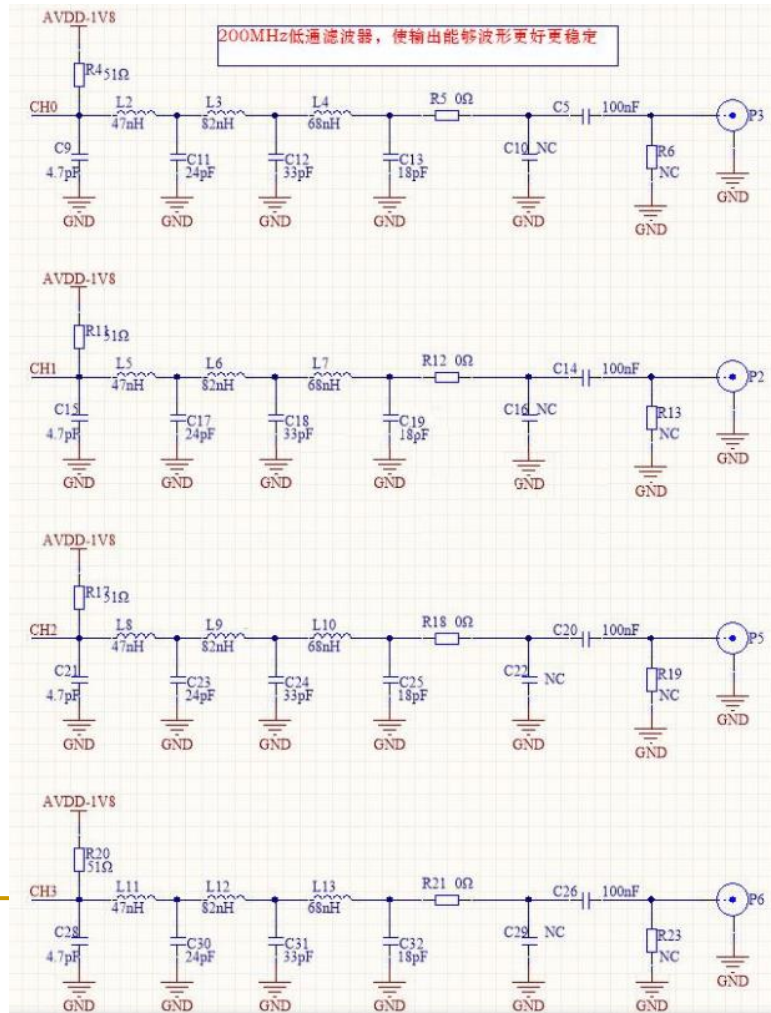
2、C题：无线传输信号模拟系统

■ 基于AD9959的设计方案



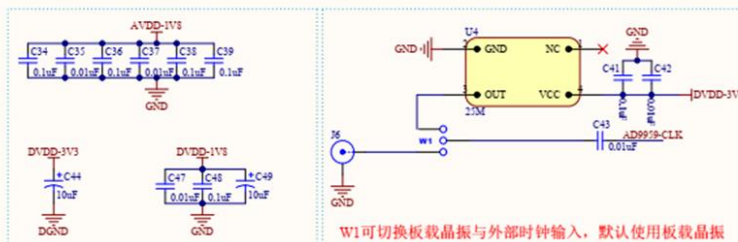
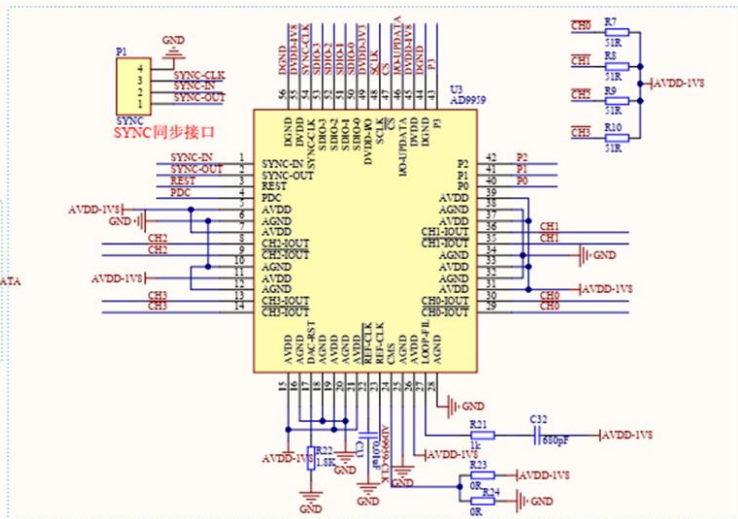
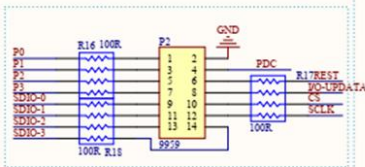
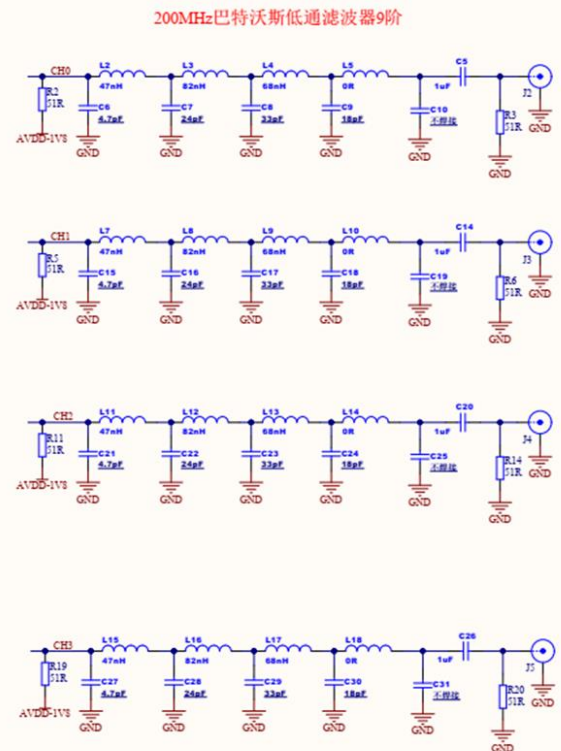
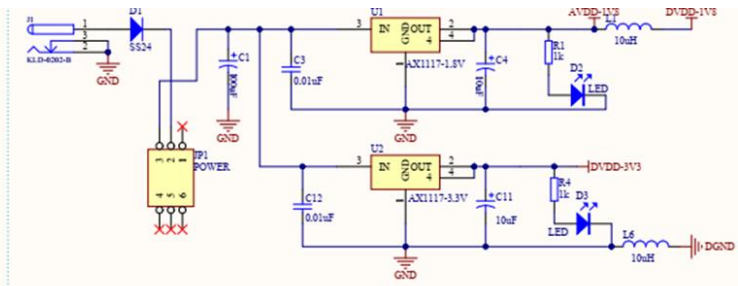
2、C题：无线传输信号模拟系统

- DDS芯片AD9959需要外加平滑滤波器



2、C题：无线传输信号模拟系统

对应的原理电路：

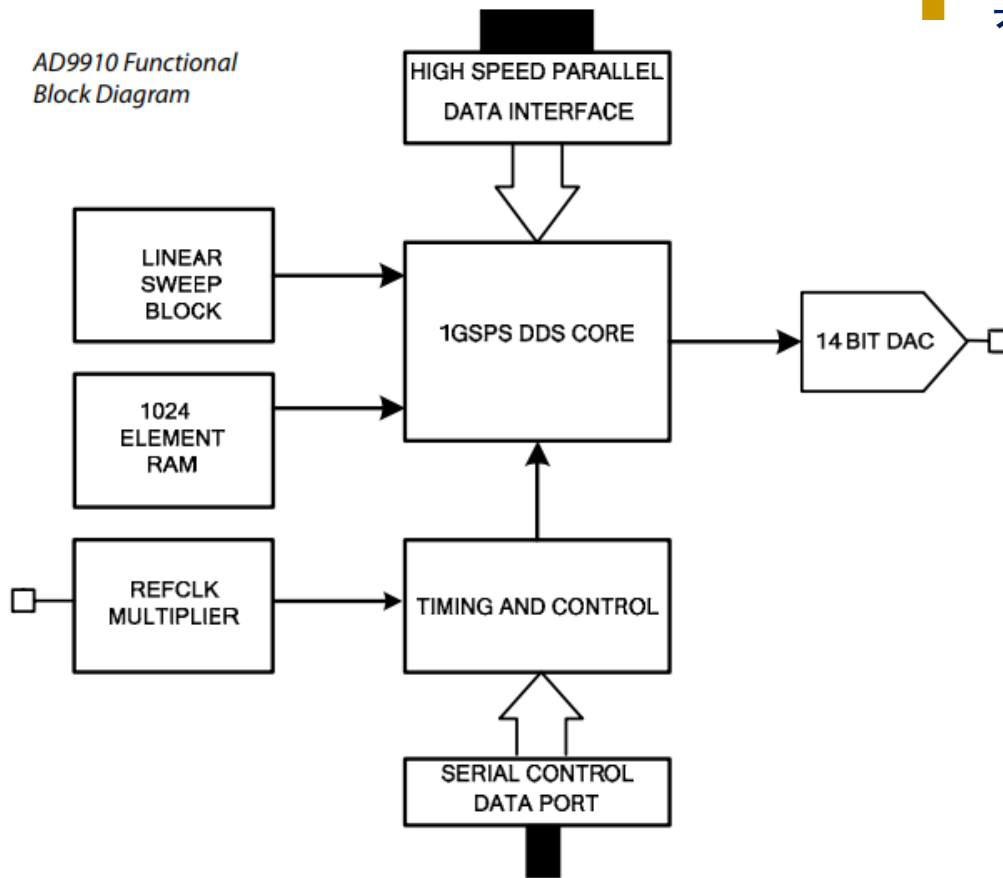


W1可切换板载晶振与外部时钟输入，默认使用板载晶振

2、C题：无线传输信号模拟系统

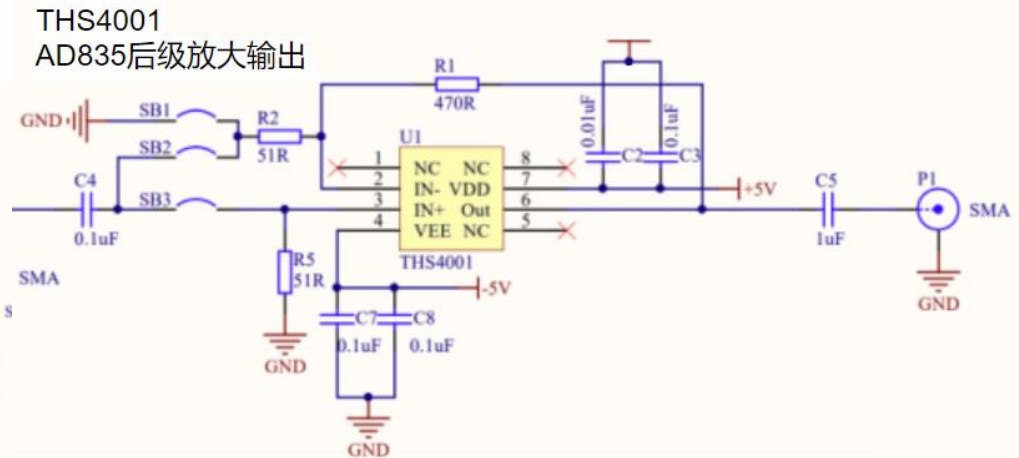
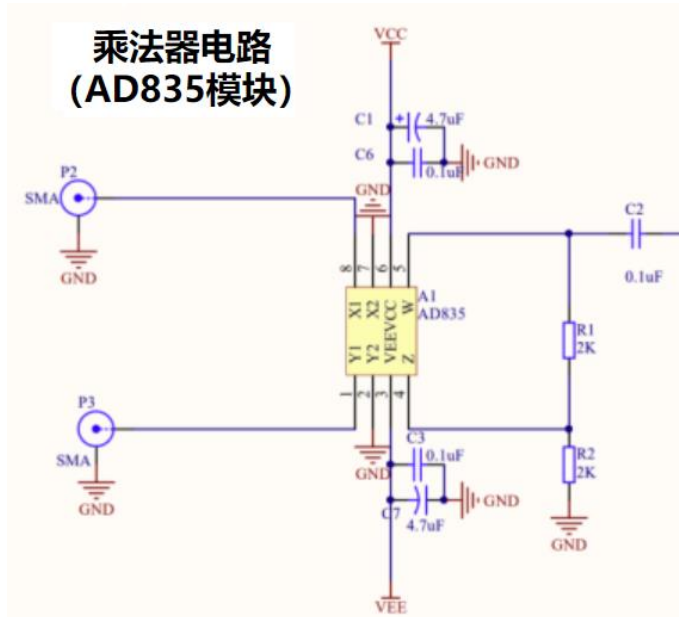
■ 其他典型的DDS芯片：

- AD9910是一款内置14 bit DAC的直接数字频率合成器（DDS），支持高达1 GSPS的采样速率。用户可以访问三个用于控制DDS的信号控制参数，包括：频率、相位与幅度。AD9910利用32 bit累加器提供快速跳频和频率调谐分辨率。在1 GSPS采样速率下，调谐分辨率为~0.23 Hz。

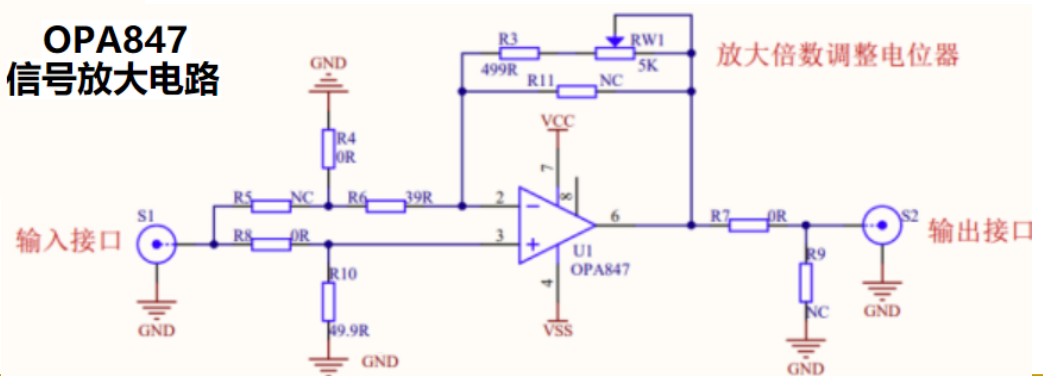


2、C题：无线传输信号模拟系统

- 作品中的AM调制、放大/衰减以及合路电路

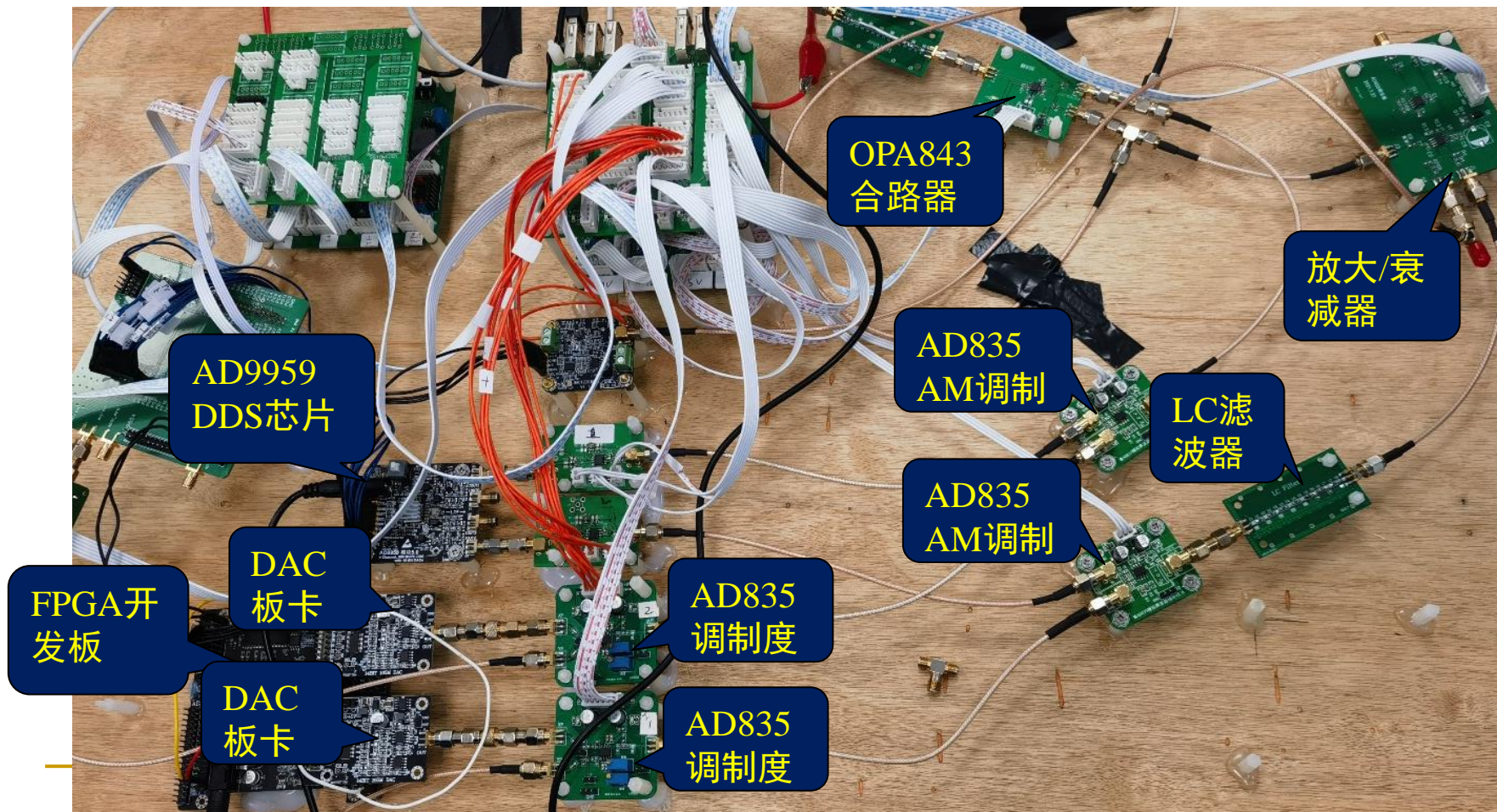


**OPA847
信号放大电路**



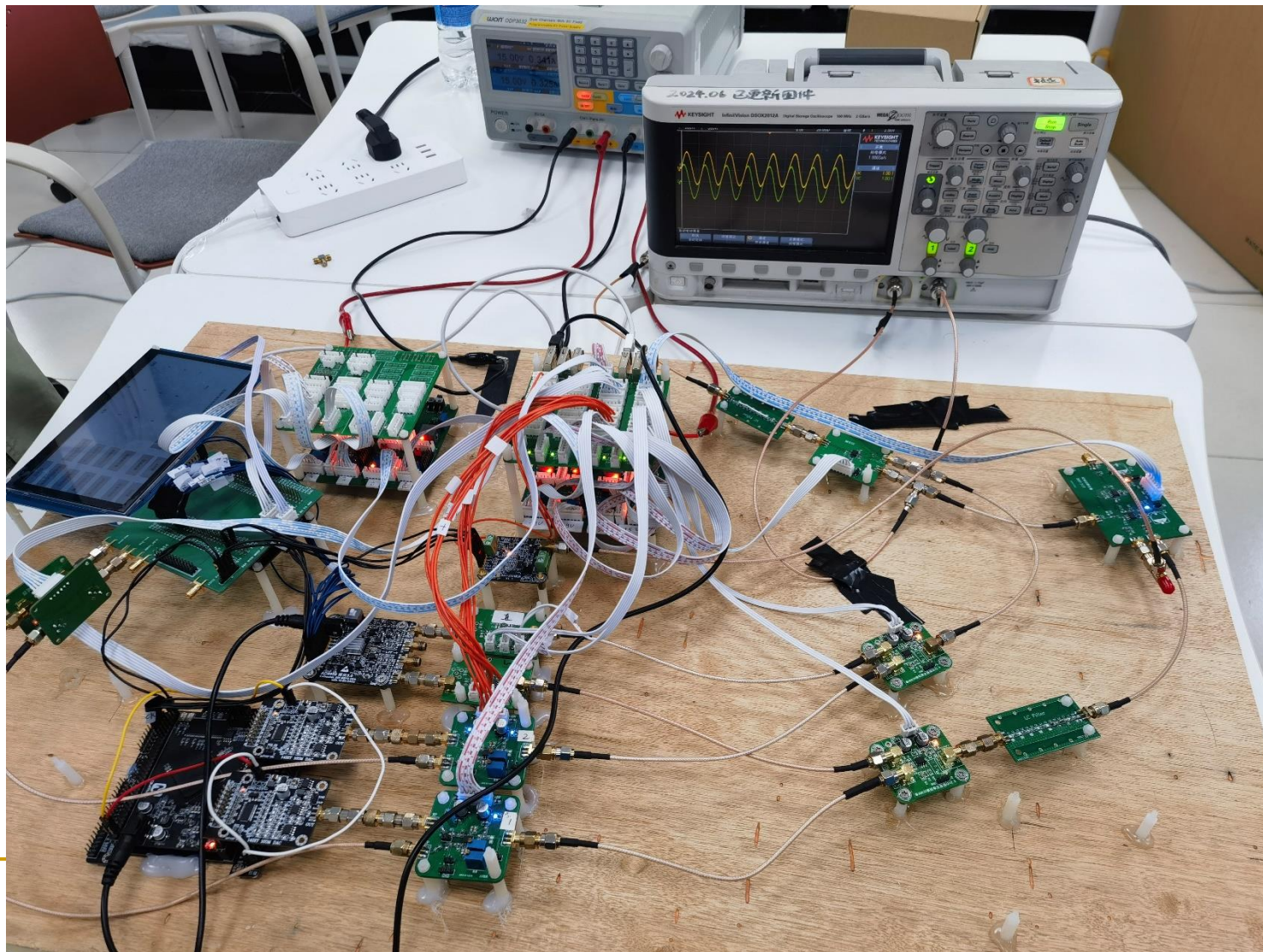
2、C题：无线传输信号模拟系统

■ 作品中的展示



2、C题：无线传输信号模拟系统

■ 作品中的展示

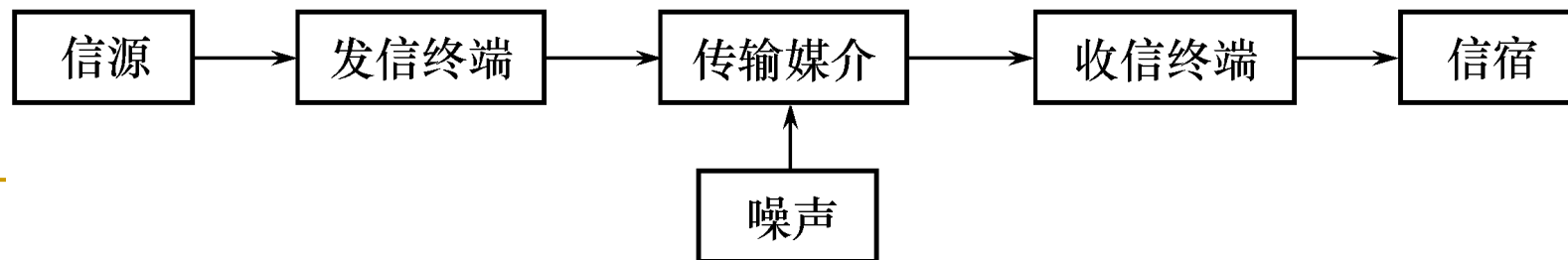


3、C题涉及关键知识点的解读

- 通信类题目主要针对通信电路设计和通信网络应用。
- 通信内涵：**随时随地**有效实现人与人、人与物和物与物的信息交流与传递；
- 通信系统构成：**通信信息的处理、传输、交换、显示（终端）**；



- 一般通信模型：



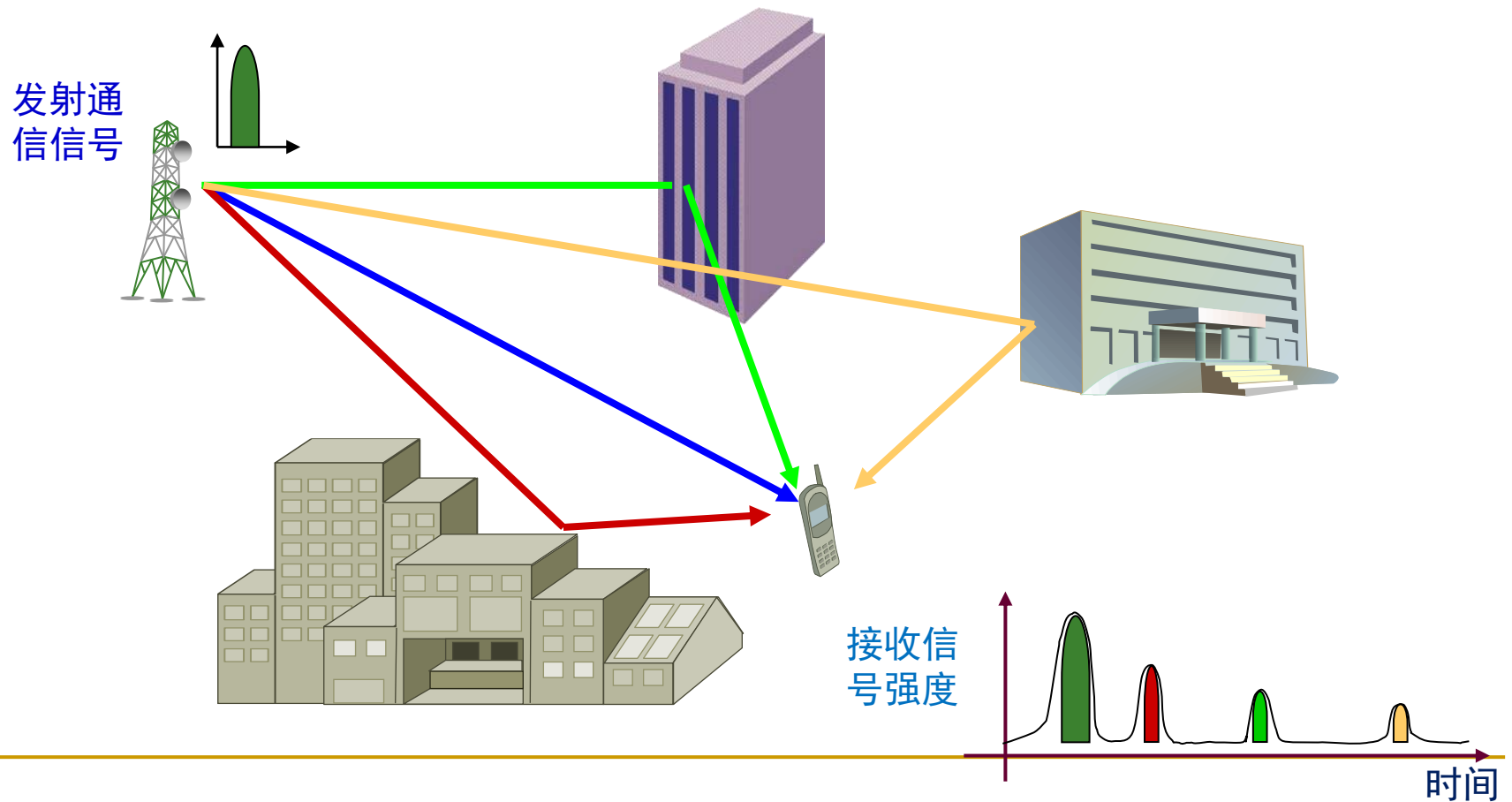


3、C题涉及关键知识点的解读

- 一般通信系统可以根据传输媒介分成分为导向的 (guided) 和非导向的 (unguided) 两类：
 - 对导向媒介，电磁波被引导沿某一固定媒介前进，例如双绞线、同轴电缆和光纤；
 - 非导向媒介的例子是大气空间，它们提供了传输电磁波信号的手段，但不引导它们的传播方向，这种传输形式通常称为无线传播 (wireless transmission)。
- 大多数应用是**基于无线环境**，在全国电赛的命题中针对短距离无线通信设计和应用居多。
- 本次赛区赛的命题题目，是针对**无线传输媒介对通信信号的影响**这一概念进行设计。

3、C题涉及关键知识点的解读

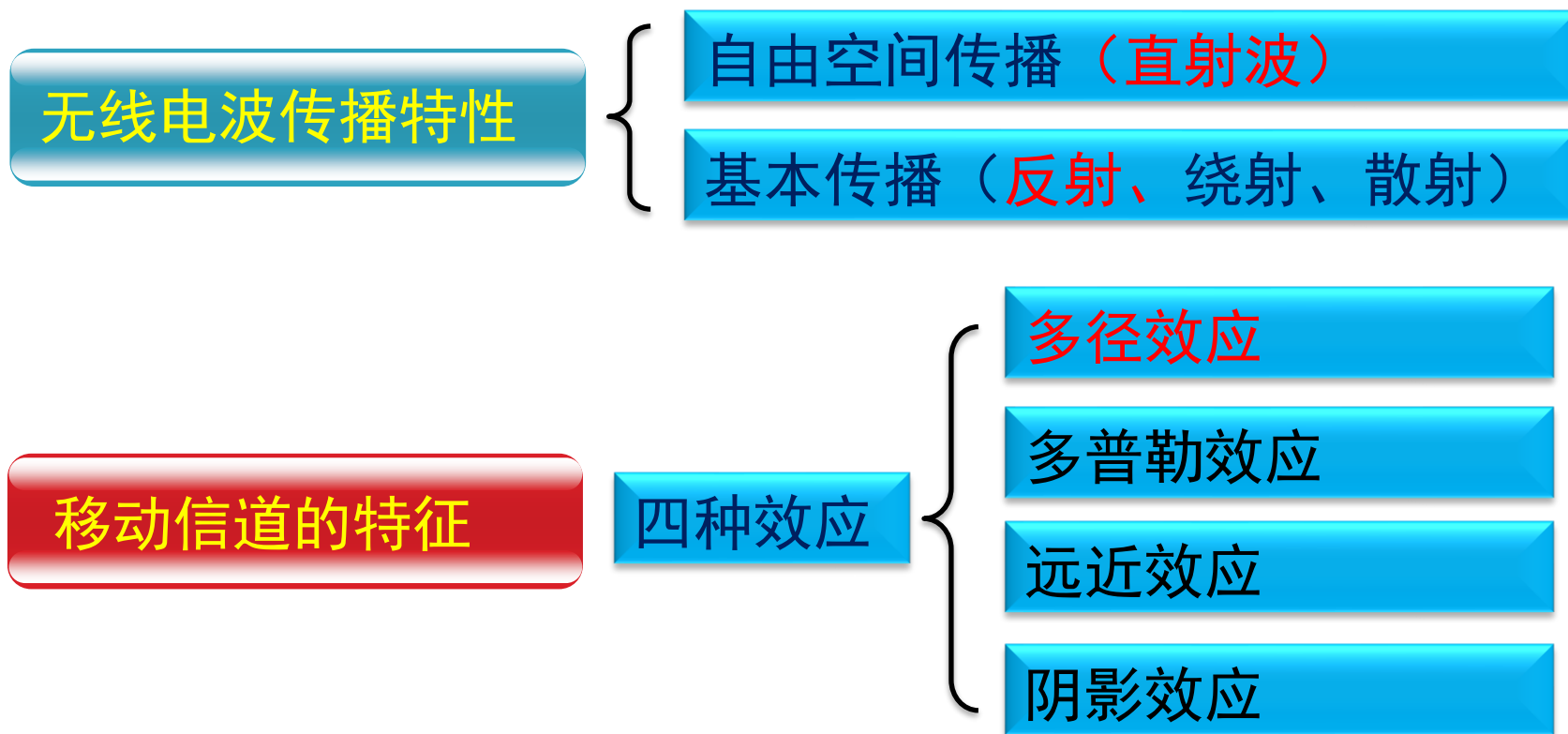
■ 无线传播基本原理最核心概念 — 传播途径（多径）





3、C题涉及关键知识点的解读

■ 传播途径对电波传输的影响





3、C题涉及关键知识点的解读

- 本题目基本思想是通过模拟产生出受环境影响的无线通信传输信号，以此来学习和掌握无线传输技术，加强《无线通信技术》等相关课程、以及射频信号分析和射频电路相关实验内容建设。
- 本题目的核心知识点：
 - ① 通信传输媒介与分类
 - ② 无线传输的多径信道概念
 - ③ 通信信号到射频信号（频点/频段）
 - ④ 通信射频信号的产生

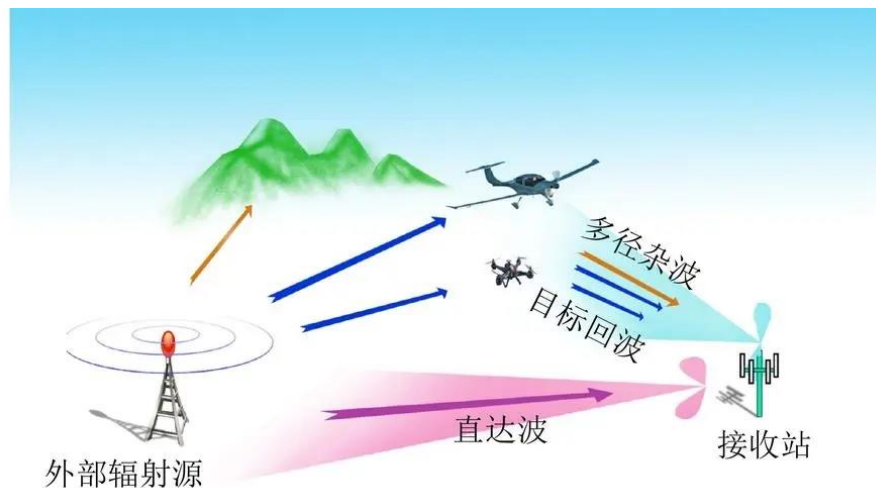
○ ○ ○ ○ ○ ○

3、C题涉及关键知识点的解读

波段名	亚毫米波 (Sub-mm)	毫米波	厘米波	分米波	超短波 (Metric Wave)	短波 (SW)	中波 (MW)	长波 (LW)	甚长波	特长波	超长波	极长波
	微波 (MicroWave)											
波长 λ	0.1~1 mm	1~10 mm	1~10 cm	10~100 cm	1~10 m	10~100 m	100~1000 m	1~10 km	10~100 km	100~1000 km	$10^3 \sim 10^4$ km	10^4 km 以上
频率 f	3000~300 GHz	300~30 GHz	30~3 GHz	3000~300 MHz	300~30 MHz	30~3 MHz	3000~300 kHz	300~30 kHz	30~3 kHz	3000~300 Hz	300~30 Hz	30 Hz 以下
频段名		EHF 极高频	SHF 超高频	UHF 特高频	VHF 甚高频	HF 高频	MF 中频	LF 低频	VLF 甚低频	ULF 特低频	SLF 超低频	ELF 极低频

当频率 $f > 30\text{MHz}$ 时，
典型的传播通路有：

- ①直射波、②反射波、
- ③地表面波





3、C题涉及关键知识点的解读

- **直达信号**：可以认为是自由空间传播所接受的通信信号。这里自由空间传播的含义：
 - 广义上，只要地面上空的大气层是各向同性的均匀媒质，其相对介电常数 ϵ 和相对导磁率 μ 都等于1，传播路径上没有障碍物阻挡，到达接收天线的地面反射信号场强也可以忽略不计，即可视作在自由空间传播。
- 直达信号的传输特性：无线电波经过一段路径的自由空间传播之后，由电磁波能量扩散而引起的传播损耗（弥散损耗），导致能量衰减：

$$[L_{fs}](dB) = 32.44 + 201gd(km) + 201gf(MHz)$$



3、C题涉及关键知识点的解读

- **多径信号**：当电波传播中遇到两种不同介质的光滑界面时，且界面尺寸比电波波长大得多，就会产生镜面反射。在复杂传输环境中一些反射信号会达到接受天线被接收机接收，这就是多径信号。

- 反射信号的特性用反射系数 γ 表征，它定义为反射波场强与入射波场强的比值， γ 可表示为：

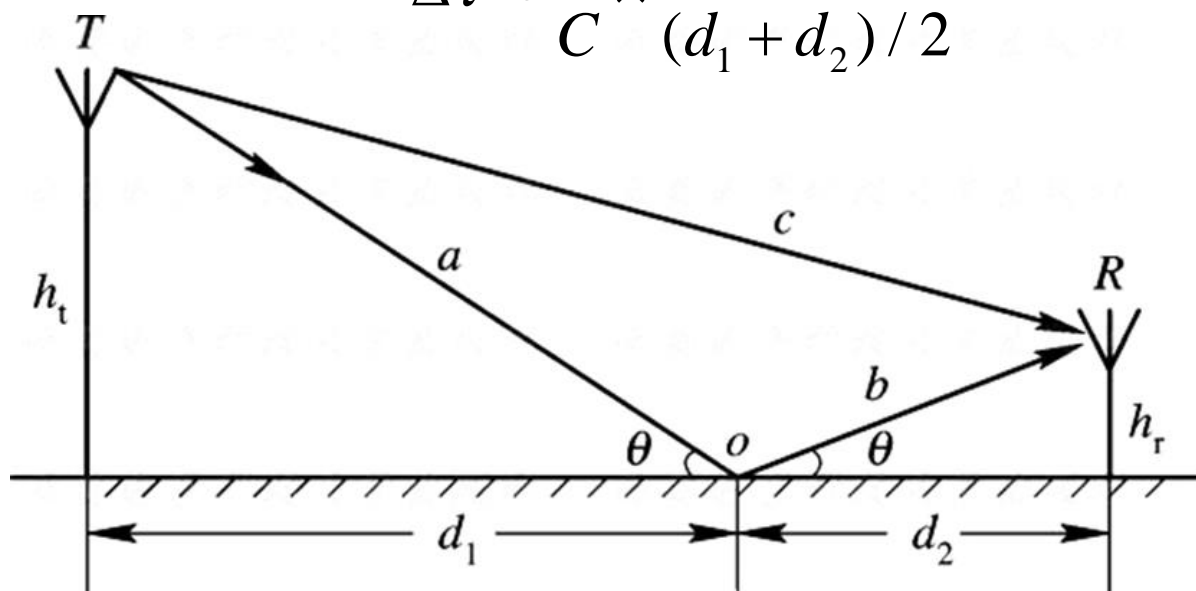
$$\gamma = |\gamma| e^{-j\psi}$$

- $|\gamma|$ 为反射点上反射波场强与入射波场强的振幅比， ψ 代表反射波相对于入射波的相移。

3、C题涉及关键知识点的解读

- 多径信号**：由发射点发出的电波分别经过直达路径与反射路径到达接收点 R，由于两者的路径不同，多径信号相对直达信号会产生附加时延。

$$\Delta\tau \approx \frac{1}{C} \times \frac{h_t \times h_r}{(d_1 + d_2) / 2}$$



多径信号（反射波）与直达信号（直达波）的路径图示与计算。

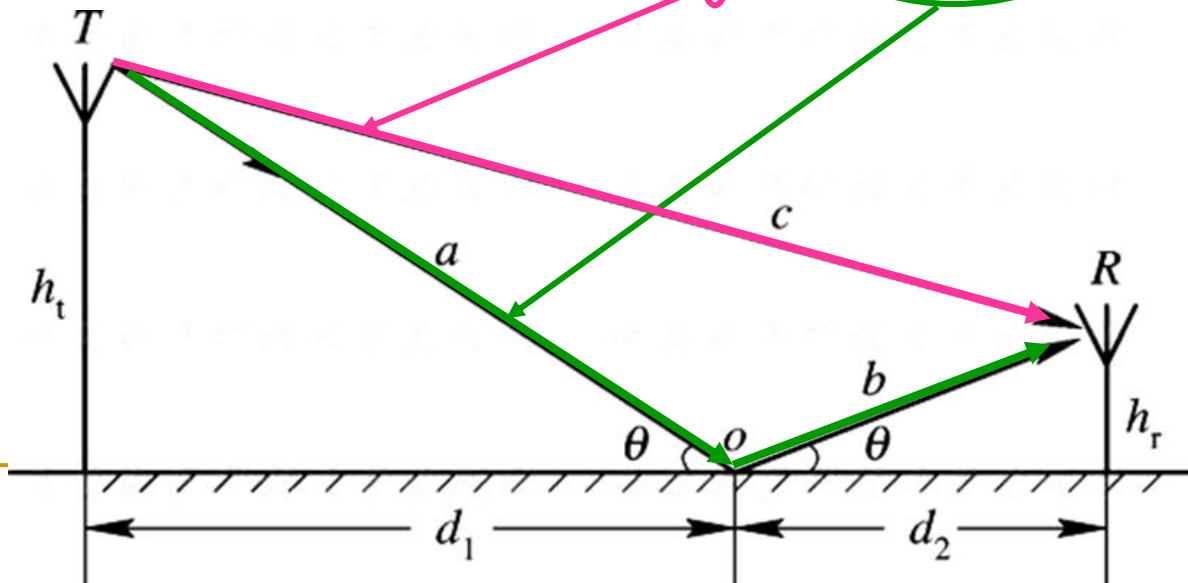
3、C题涉及关键知识点的解读

- 存在一路多径的无线传输信号接收的信号场强：

$$E = E_0(1 + \gamma e^{-j2\pi f_c \Delta\tau}) = E_0(1 + |\gamma| e^{-j(\psi + 2\pi f_c \Delta\tau)})$$

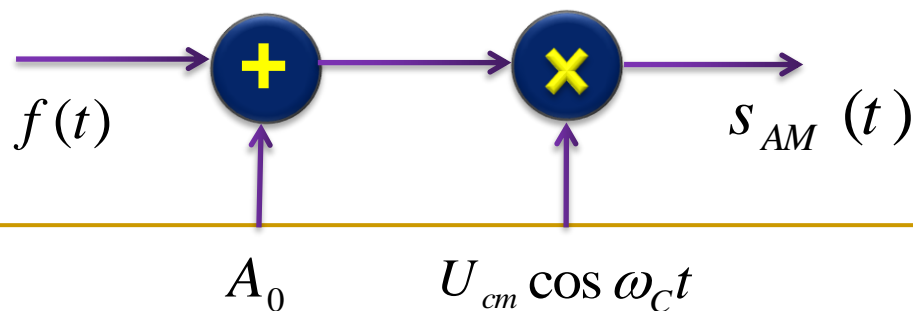
- 接收信号功率：

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_R G_T |1 + \gamma e^{-j2\pi f_c \Delta\tau}|^2$$



3、C题涉及关键知识点的解读

- **直达信号的模拟产生方法：**首先本题目简化了通信信号格式，只要求产生连续波信号和调幅信号。
 - 什么是连续波(CW)信号：以正弦信号的载波信号；
 - 什么是连续波(CW)调制：以正弦信号作载波的调制为连续波(CW)调制；
 - 什么是调幅(AM)信号：让基带信号（调制信号） $f(t)$ 去控制载波的幅度形成的通信射频信号。
- **本题AM调制要求：**调制信号 $f(t)$ 为2MHz的正弦信号，AM调制系数可调。



3、C题涉及关键知识点的解读

AM调制信号频谱：

单音调制信号：

$$u_{\Omega}(t) = \cos \Omega t$$

调制后信号：

$$u_{AM}(t) =$$

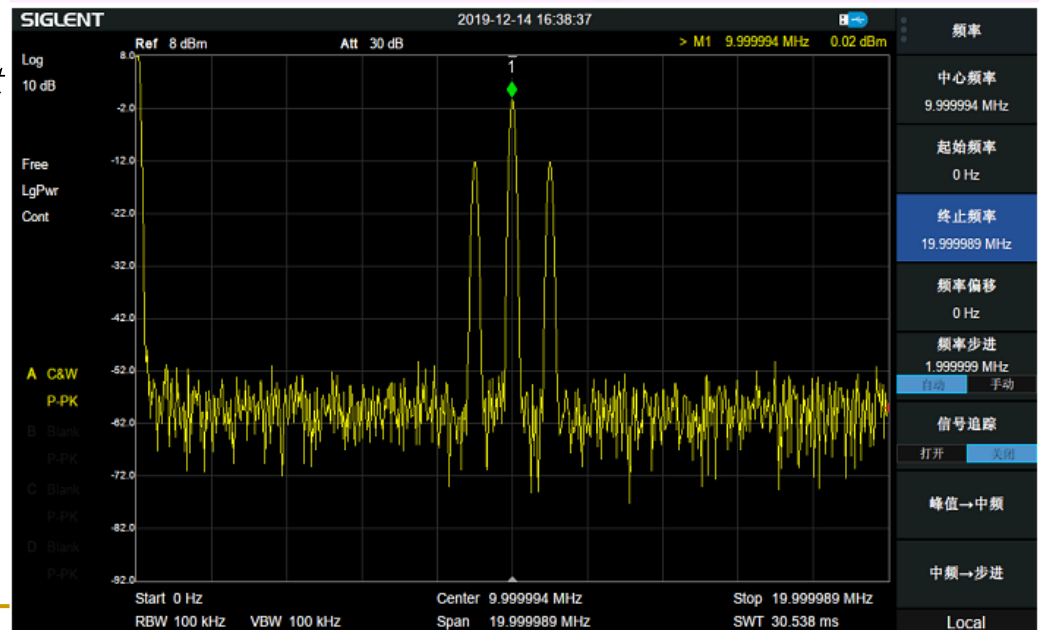
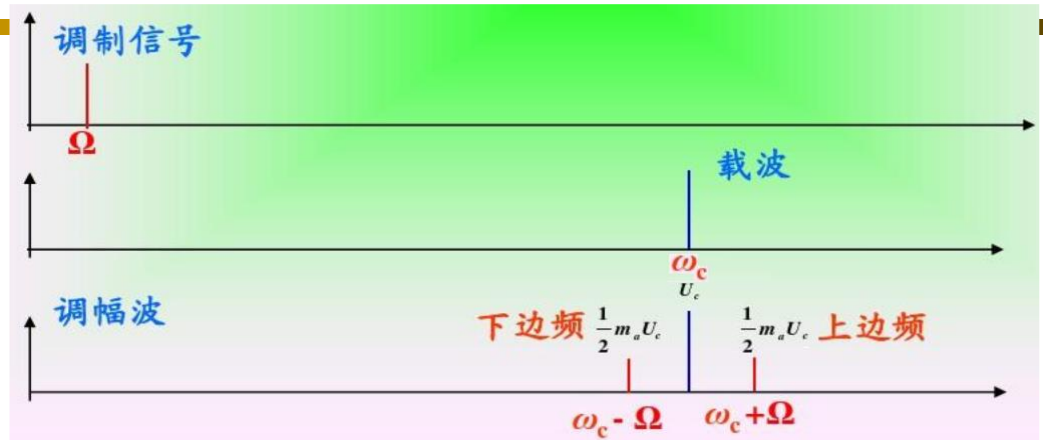
$$U_{cm} (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

本题目要求

$$\Omega = 2\pi \times 2\text{MHz}$$

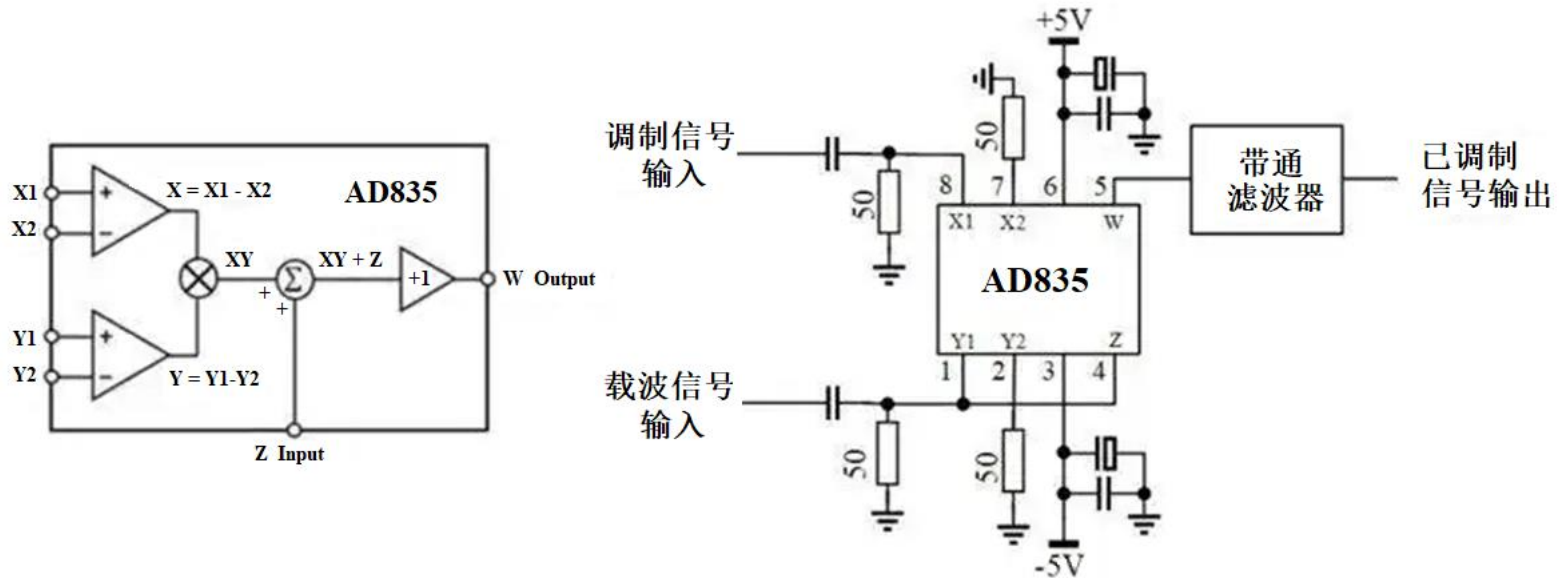
$$m_a = 0.3 \sim 0.9$$

$$U_{cm} \text{ 有效值} = 100\text{mV} \sim 1\text{V}$$



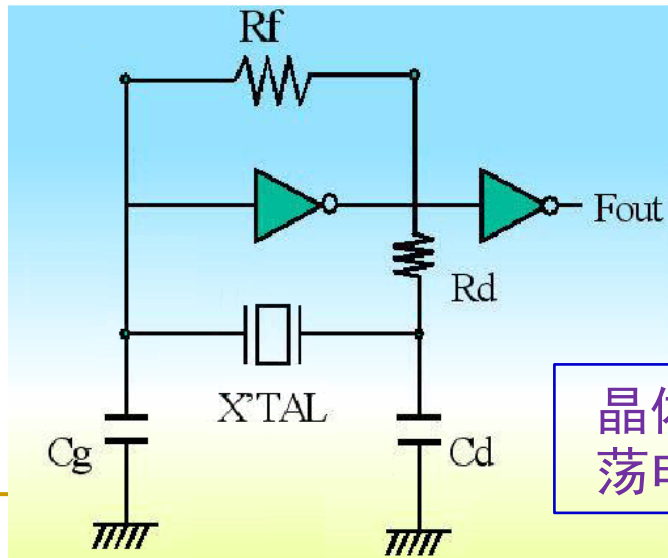
2、C题：无线传输信号模拟系统

■ AM调制的实现

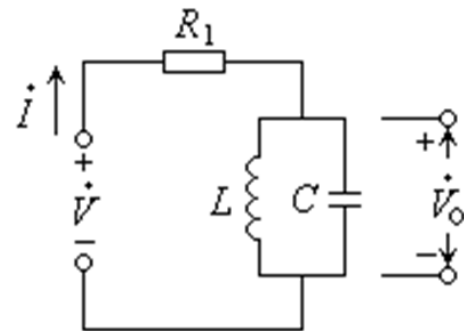


3、C题涉及关键知识点的解读

- 直达信号的模拟产生方法：**其次，本题目对通信信号的载波频率进行了分级，基本要求是一个单频的无线传输信号模拟产生，其次是推广到30~40MHz频段的无线传输信号模拟产生。
 - 点频载波**可以直接使用晶体振荡器，或LC振荡器；



晶体振荡电路

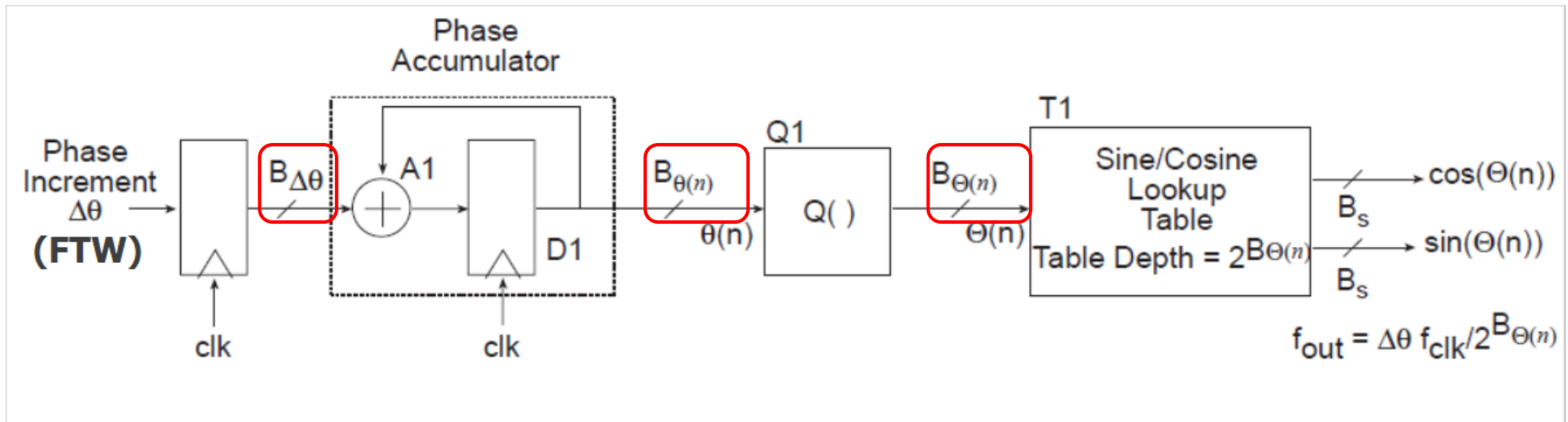


LC并联谐振电路

3、C题涉及关键知识点的解读

■ 直达信号的模拟产生方法：

- 覆盖30~40MHz频段需要通过DDS芯片，或者基于PLL电路来实现；
- 采用DDS芯片关键—频率控制字和DITHER技术



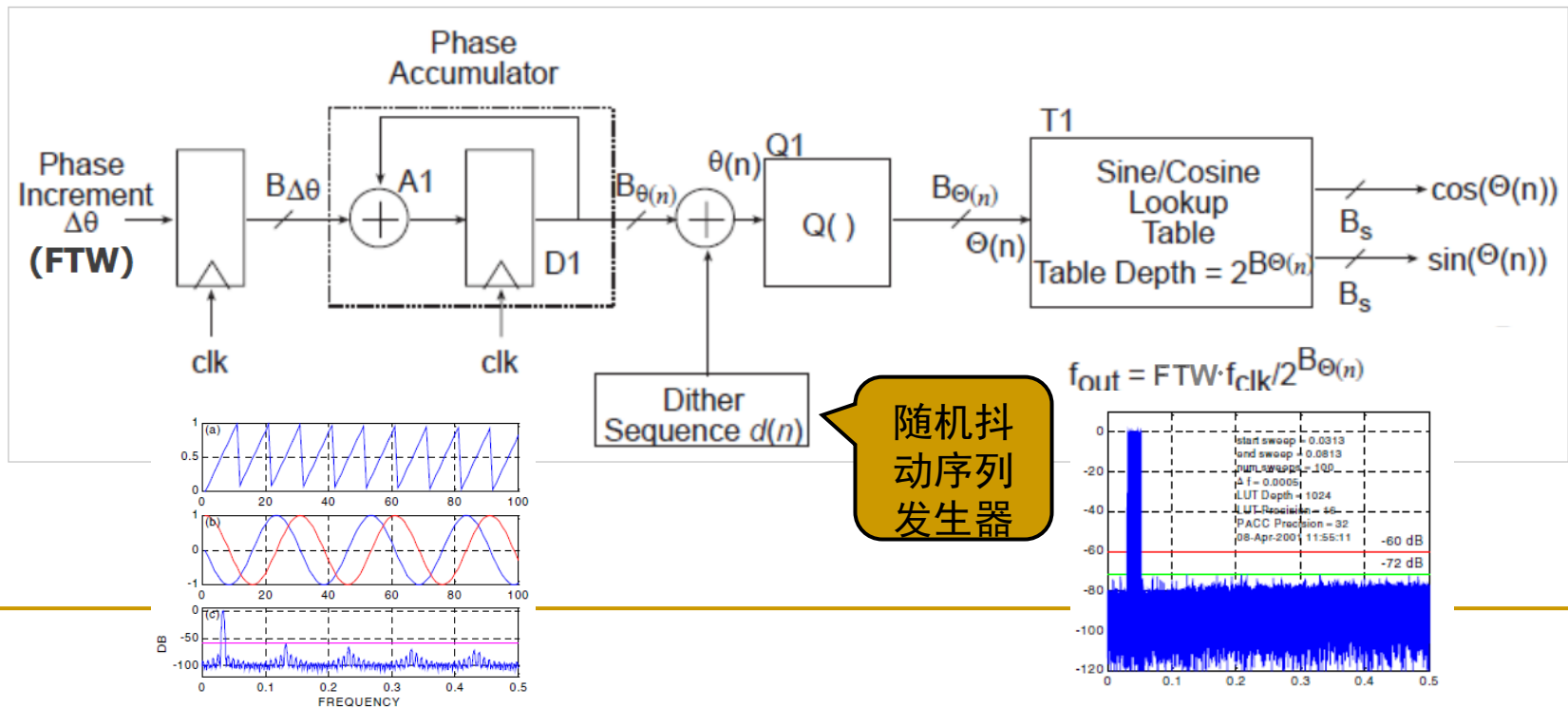
- 频率调谐字FTW，是通过相位增量 $\Delta\theta$ 来体现，本身是无单位（不代表具体弧度）无符号数。

$$\begin{aligned}
 f_{out} &= (FTW \times f_{CLK}) / 2^{B_{\Theta(n)}} \\
 &= (\Delta\theta \times f_{CLK}) / 2^{B_{\Theta(n)}}
 \end{aligned}$$

3、C题涉及关键知识点的解读

■ 直达信号的模拟产生方法：

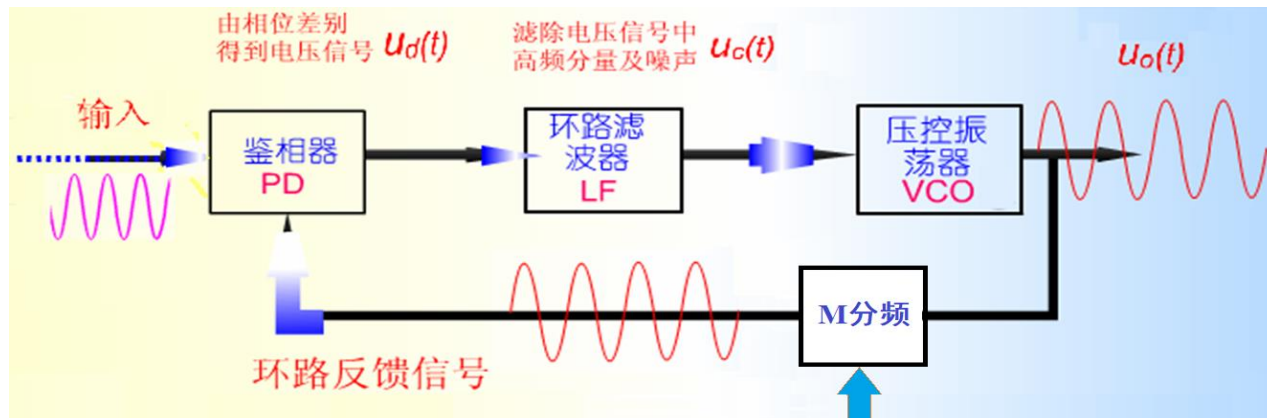
- 覆盖30~40MHz频段需要通过DDS芯片，或者基于PLL电路来实现；
- 采用DDS芯片关键—频率控制字和DITHER技术



3、C题涉及关键知识点的解读

■ 直达信号的模拟产生方法：

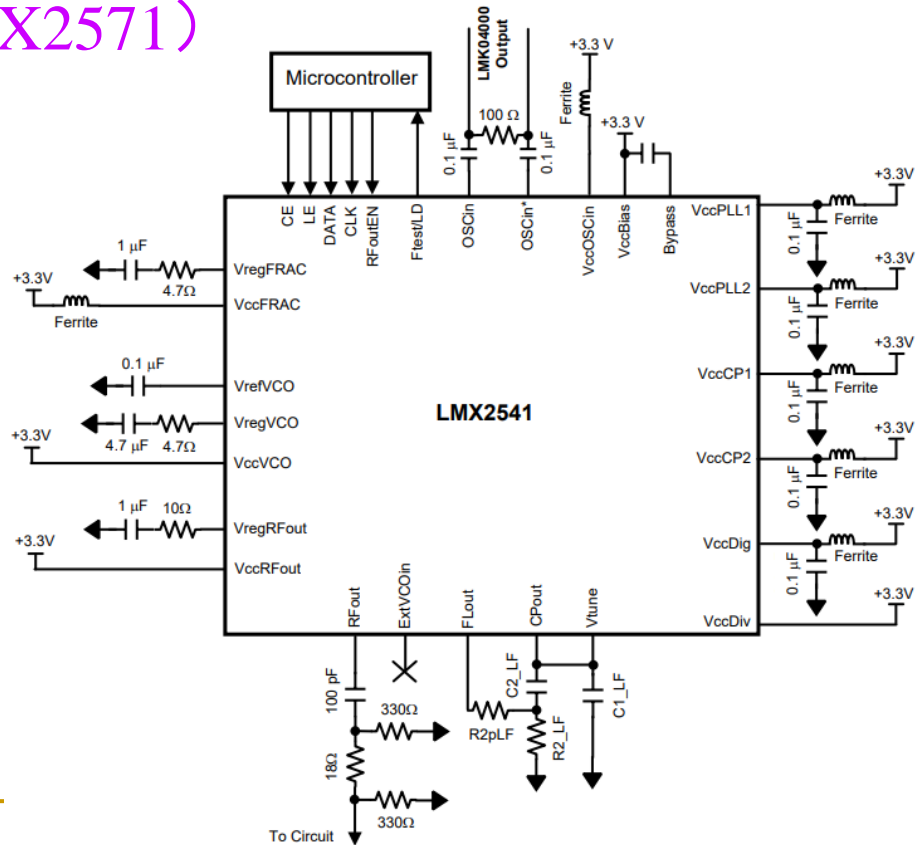
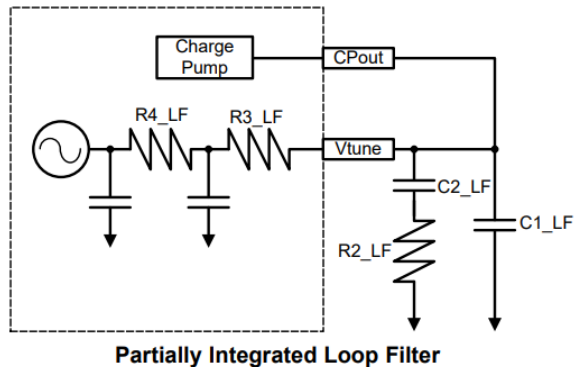
- 覆盖30~40MHz频段需要通过DDS芯片，或者基于PLL电路来实现；
- 采用PLL芯片设计关键——环路滤波器设计和可编程输出分频控制；



3、C题涉及关键知识点的解读

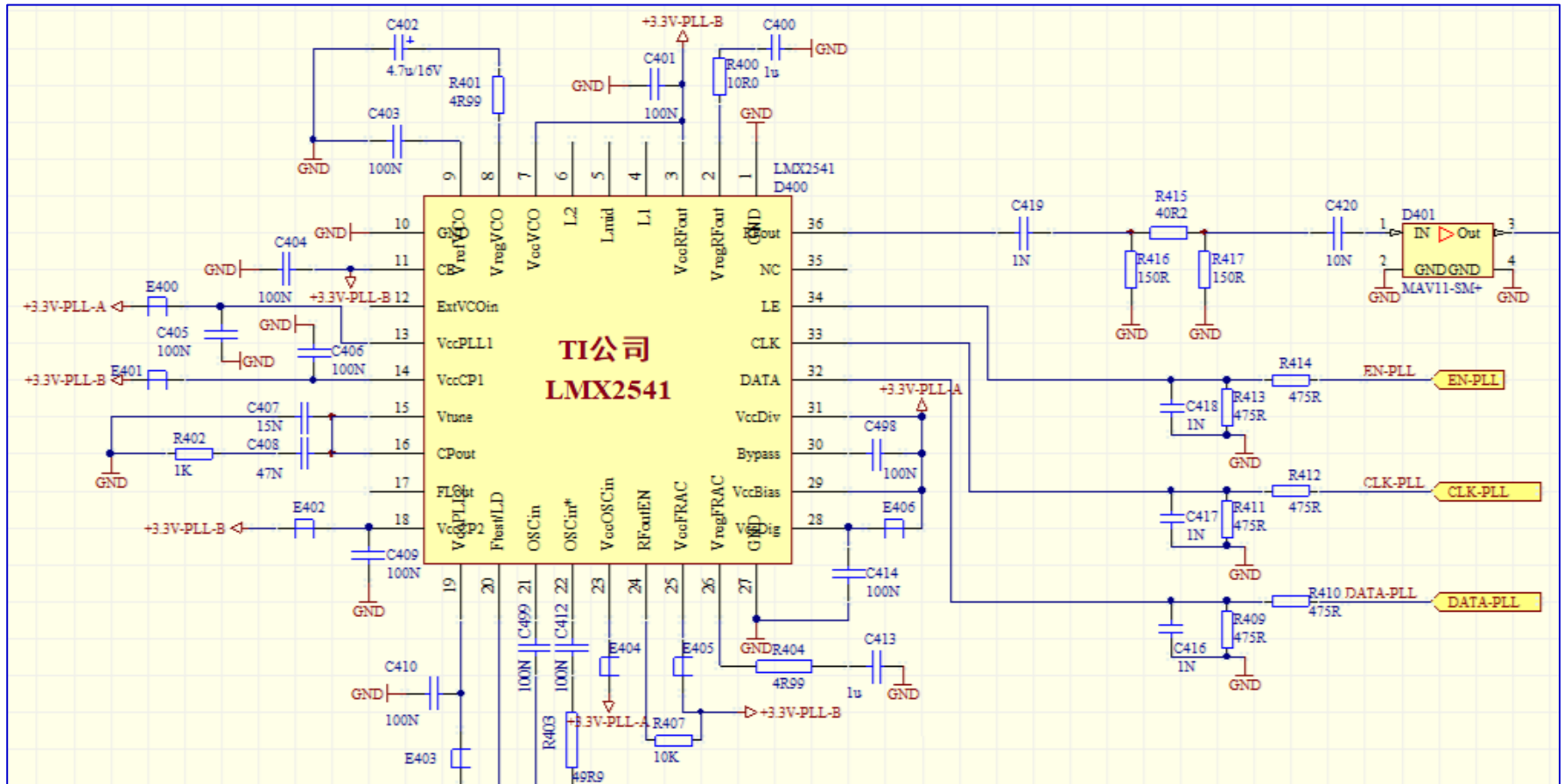
■ 直达信号的模拟产生方法：

- 采用PLL芯片例子：使用了TI的LMX2541（本题目设计应该采用LMX2571）



3、C题涉及关键知识点的解读

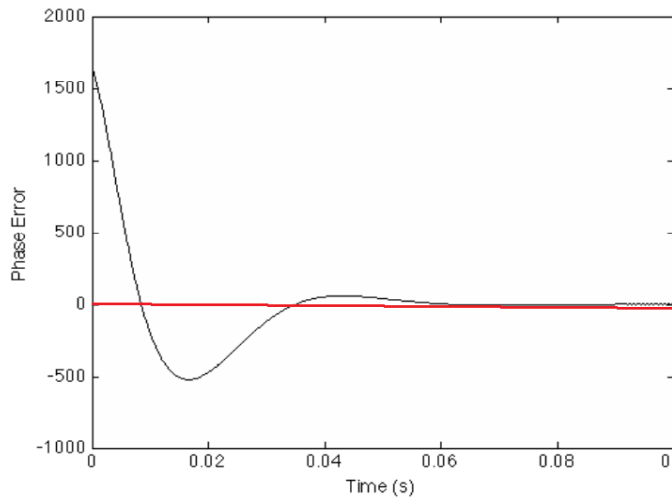
■ 直达信号的模拟产生方法：



3、C题涉及关键知识点的解读

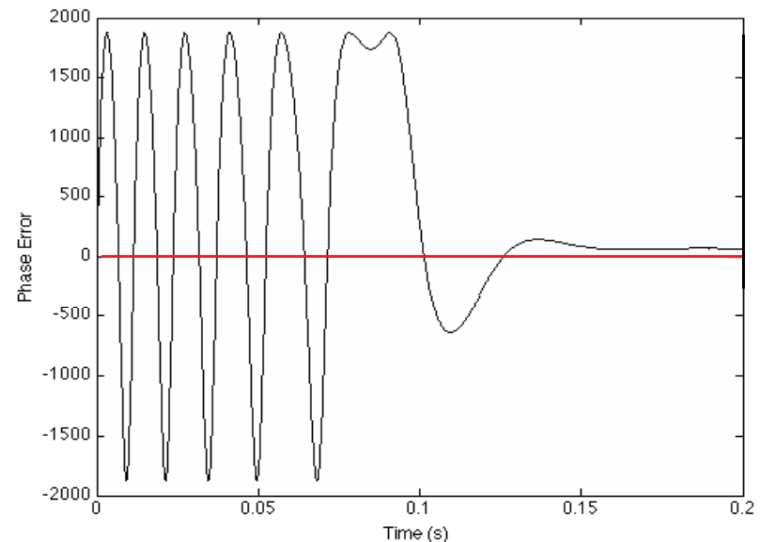
- 直达信号的模拟产生方法：
 - 不同阶锁相环的性能分析（取决滤波器 $F(s)$ ）

载波相位跟踪图示：



只有相差的情况 $\Delta\theta$

有频差的情况 $\Delta\omega$





3、C题涉及关键知识点的解读

- **多径信号的模拟产生方法：**在本题目的设计要求中，多径信号设计是在直达信号设计的基础上，经过可编程的衰减、时延和相移来模拟实现。

- **多径信号的数学表达与模拟产生思路：**

- 对于CW信号而言：

直达信号： $S_D = A_D \cos \omega_c t$

多径信号： $S_M = A_D \times \gamma \times \cos(\omega_c(t + \tau) + \varphi)$

γ ——幅度衰减

τ ——时延

φ ——多径信号初相

对于本题目要求的相对衰减、时延和相移，对于CW信号是很容易的，只需要**可控幅度衰减和载波相位即可！！！！**

3、C题涉及关键知识点的解读

■ 多径信号的数学表达与模拟产生思路：

➤ 对于AM信号而言：

直达信号： $S_D = A_D (1 + m_a \cos(\omega_m t)) \cos \omega_c t$

多径信号： $S_M = A_D \times \gamma \times \left[1 + m_a \cos(\omega_m (t + \tau) + \varphi_m) \right]$
 $\times \cos(\omega_c (t + \tau) + \varphi)$

其中： $\omega_m = 2\pi \times 2 \times 10^6$

$$\varphi_m = \varphi \times \frac{\omega_m}{\omega_c}$$

Tips:

窄带信号可忽略 φ_m

对于本题目要求的相对时延和相移等要求，对于AM信号就比较复杂，需要将信号时延和载波初相，在被调整信号上对应反应出来，并加以程控！！

3、C题涉及关键知识点的解读

- **相移和时延的区别**：相移只在 $0\sim 2\pi$ 范围，延时可以是很多载波周期，从信号表达上时延和相移是相关的概念，在通信领域时延和相移有不同意义，基于其物理机理的不同。


- 对于单一频率载波的无线传输信号：

$$\Delta\psi = 2\pi f \times \Delta\tau$$

- 对于一个频段的无线传输信号：

移相器： $\Delta\psi$ 恒定，对应时延 $\Delta\tau$
与载波频率 f 成反比

延迟器： $\Delta\tau$ 恒定，对应相移 $\Delta\psi$
与载波频率 f 成正比



工程上的移相器和延迟器实现机理也不同！！



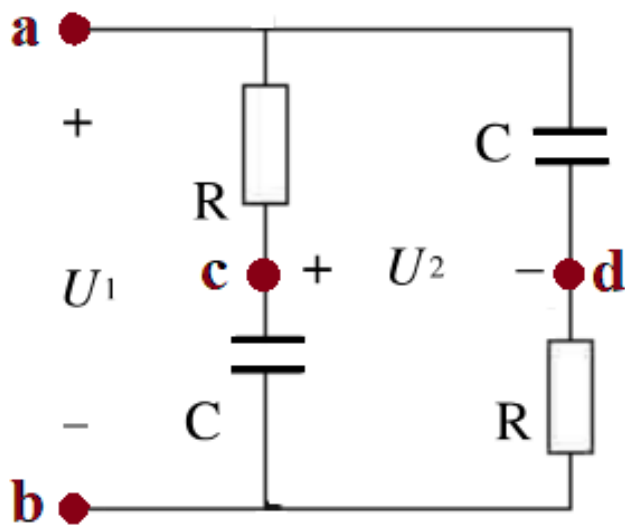
3、C题涉及关键知识点的解读

- **多径信号的数字产生方法：**在本题目的设计要求中，多径信号设计是在直达信号设计的基础上，经过可编程的衰减、时延和相移来实现。
 - 如果是基于DDS芯片，时延和相位可以通过设置相位偏移字POW来实现。

$$\Phi_{off} = (POW \times 360^0) / 2^{14}$$

3、C题涉及关键知识点的解读

- **多径信号的模拟产生方法**：如果采用纯模拟实现方案，需要对直达模拟信号进行衰减、时延和相移，需要模拟移相电路和模拟时延电路。
- **典型的移相电路（1）——无源RC移相器**

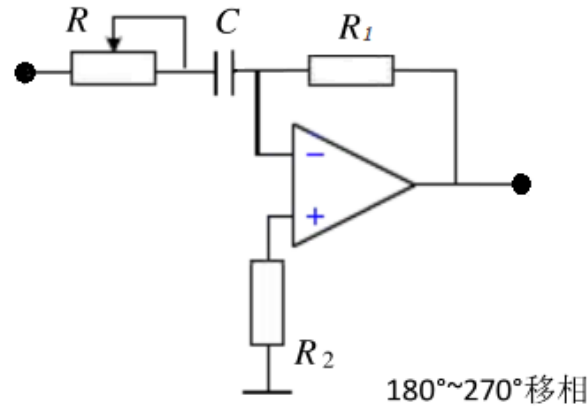
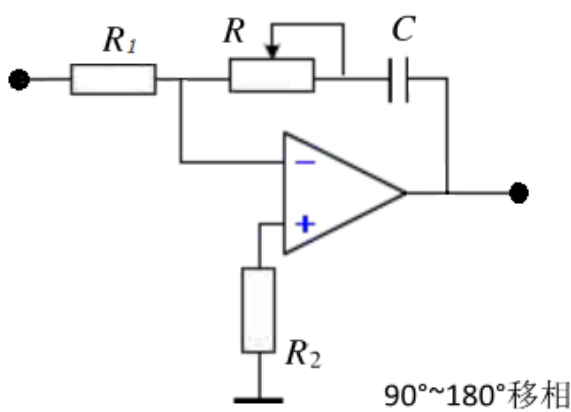
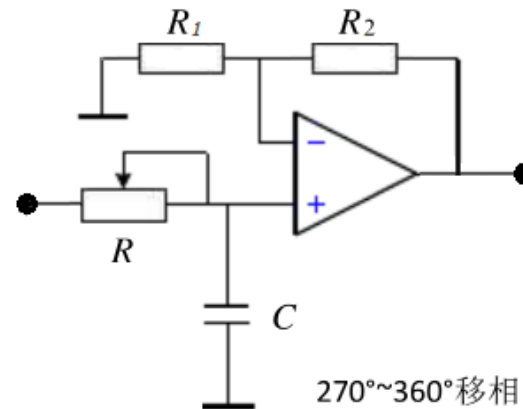
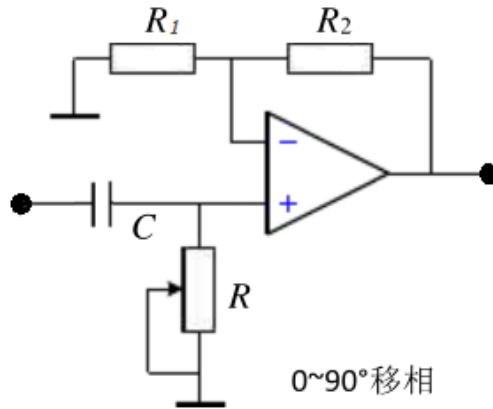


$$\begin{aligned}
 U_2 &= \frac{1 - j\omega RC}{1 + j\omega RC} U_1 \\
 &= U_1 \angle -2 \arctan(\omega RC)
 \end{aligned}$$

幅值恒定的移相器

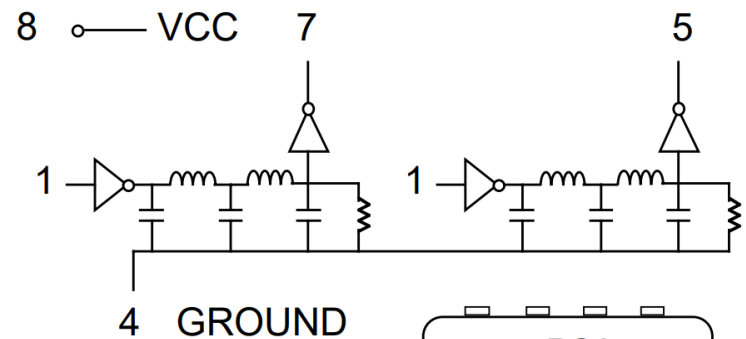
3、C题涉及关键知识点的解读

■ 典型的移相电路（2）——有源RC移相器



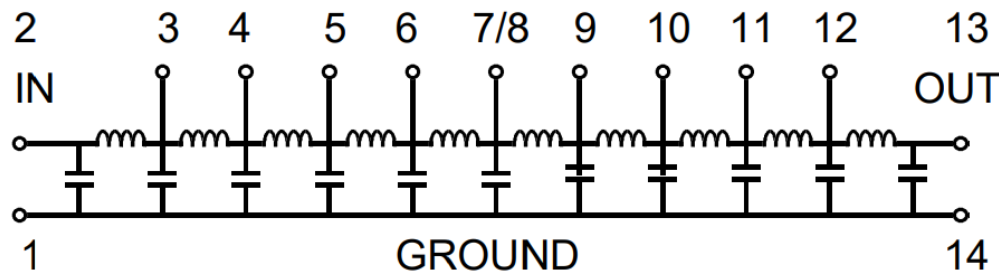
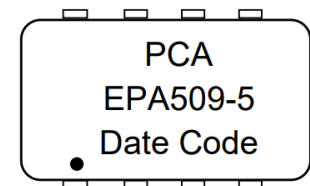
3、C题涉及关键知识点的解读

- 多径信号的模拟产生方法：**在本题目的设计要求中，多径信号设计是在直达信号设计的基础上，经过可编程的衰减、时延和相移来模拟实现。
- 典型的延迟线模拟电路**



PCA
EP198XX(-RC)

Schematic





电子科技大学

University of Electronic Science and Technology of China

谢谢大家!



电子科技大学
欢迎您们!!