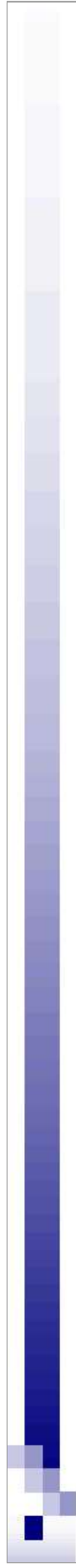


时域数字信号处理 (1)

信号的基本概念

2024-9-10

1



什么是信号？

- 信号的朴素定义：传递信息的（序列）载体。
 - 从最早的手势，旗语，到现代的电子信号，在广义上甚至包括人类的语言，视觉，嗅觉，都是信号。
 - 声光电信号
 - 声音：歌曲——雷达——声纳
 - 光：视频——图像——卫星——监控
 - 电：网络——传真——无线通讯
 - 扩展以后的信号：旗语、手语、表情、语言、生物信号

2024-9-10

2

信息、信号与数据的区别

- 信息：information；信号：signal；数据：data
- 这三个词在计算机及相关领域都有涉及，例如 Information Science (information processing)；Signal processing；big data (data processing)
 - 信息是最抽象的，指的是抽象、明确意义，可以被接受者理解的内容；
 - 信号是信息的载体；是一种特定的数据（有时间或者位置关系）
 - 数据是所有数据的载体，可以使无序的：同样的信号，调换顺序还是这数据，但是他的信息就变了
- 理解三者的区别，有助于我们理解这门课的知识范围（Scope）

2024-9-10

3

信号的定义

- 本课程狭义的定义：一个（一维或者多维）的数据量。
 - 将前面提到的各种真实信号变成数据的过程称之为**采样**，而采样的设备通常称为**Sensor**（传感器，感知设备）
 - 传统意义**Sensor**给出的信号是模拟信号（多为电流信号），需要经过**A/D**才能变成数字信号（Analog to Digital）
 - 模拟信号定义（百度百科）：

是指用**连续变化**的物理量表示的信息，其信号的幅度，或频率，或相位随时间作**连续变化**，或在一段连续的时间间隔内，其代表信息的特征量可以在任意瞬间呈现为任意数值的信号。

- 数字信号：两个离散化的信息

■ 后文进行详细分析

2024-9-10

4

(四) $\text{Sa}(t)$ 信号(抽样信号)

$\text{Sa}(t)$ 函数即 $\text{Sa}(t)$ 信号是指 $\sin t$ 与 t 之比构成的函数, 它的定义如下

$$\text{Sa}(t) = \frac{\sin t}{t} \quad (1-9)$$

抽样函数的波形示于图 1-8。我们注意到, 它是一个偶函数, 在 t 的正、负两方向振幅都逐渐衰减, 当 $t = \pm\pi, \pm 2\pi, \dots, \pm n\pi$ 时, 函数值等于零。

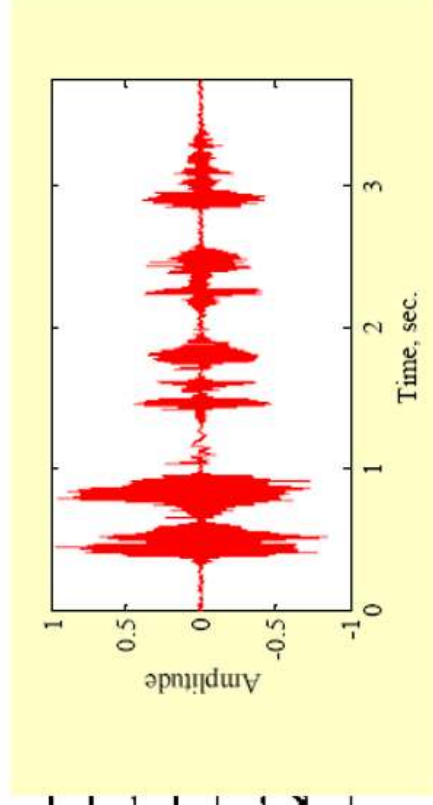
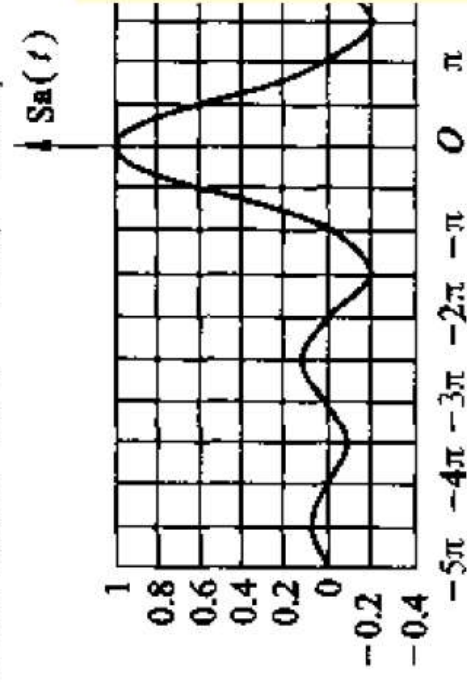


图 1-8 $\text{Sa}(t)$ 函数

信号的表示 (1)

■ 第一种信号是

- 连续的、理想的、当做工具使用的、被学习的
- 通常是由一个清晰的函数表示，也被当做一个函数研究，例如

$$y = x(t) \text{ (连续型模拟信号) 或者 } y = x(n) \text{ (离散型数字信号)}$$

■ 第二种信号是

- 离散的、待研究的、规律不明的
- 通常使用一个序列表示，例如

$$x(n) = [3, 2, 1, 4, 5] \text{ (离散型数字信号)}$$

注：上述 n 是没有单位的，而 t 是有单位的！这是由于采样造成的。（书目：章节1.1）

2024-9-10

6

单选题 1分

为什么我们对于现实信号（第二种）只给出 $x(n)$ 的表达式，而不给出 $x(t)$ 的表达式？

- ☐ A $x(n)$ 和 $x(t)$ 模拟信号差不多，没有必要
- ☐ B $x(t)$ 是无限长的，而 $x(n)$ 是有限长的
- ☐ C $x(t)$ 是无限稠密的，而 $x(n)$ 是稀疏的
- ☐ D 老师忘了吧

2024-9-10

7

数字信号处理的经典操作（书目1.2）

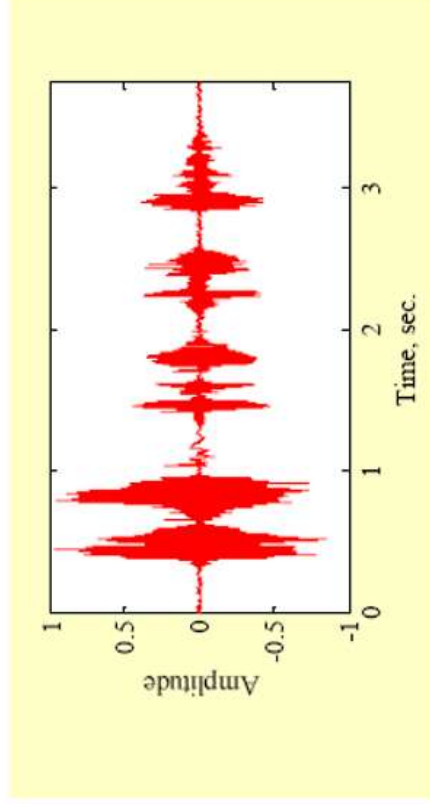
- 1.2.1 中：
 - 经典操作包括“缩放/延迟/加法” 这些操作书中也在**2.2** 详细讲解---我们保持一致
 - 复杂一点包括积分/微分等生成（我们也在**2.2**详细讲解）
 - 1.2.2 谈到过滤波（特指频域滤波），实际上在第五章（本课程）讲过频谱才出现，所以随后再讲。
- 1.2.3 复数信号（会在3.3 基本处理部分讲解）
- 1.2.4-1.2.5 调频，解调 -- 在**第2章**基础操作中讲

2024-9-10

8

典型讯号的范例-1（书目1.3）

- 语音与音乐讯号：表示空间中一个点上空气压力的时间函数。
- “I like digital signal processing” 的语音波形 如下。



针对这段语音，DSP和AI所承担的任务不同：

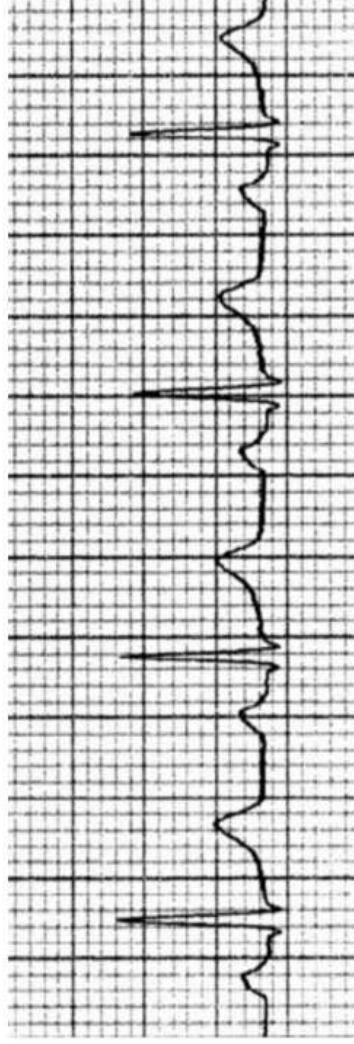
- DSP：过滤掉噪音；保证信号稳定；对于输入有即时的响应；可以处理**最基础**的对比工作
- AI：分析语音、转换成文字、分析文字、理解意思

2024-9-10

9

典型讯号的范例-2

- 心电图 (ECG-electrocardiogram) 讯号 – 表示心脏的电性活动。
- 一个典型心电图讯号如下：



一个经典的案例：使用**DSP**技术处理病人的心跳异常（停止、不规律）

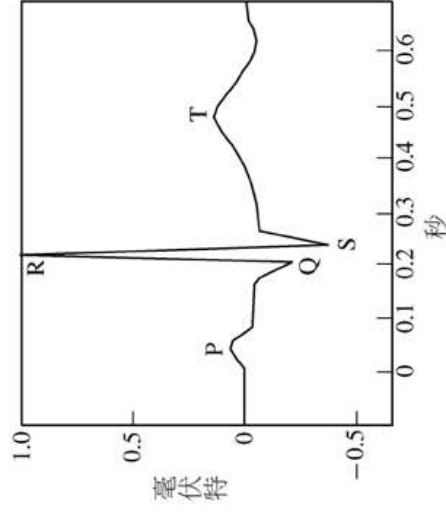
注：在我们这节课涵盖技术中，**DSP**指的是基础的处理方法的组合，不是仅限于数字电路的实现

2024-9-10

10

典型讯号的范例-3

- ECG 讯号是一个周期性的波形。
- 一个周期性的 ECG 波形表示血液由心脏送到动脉的过程。

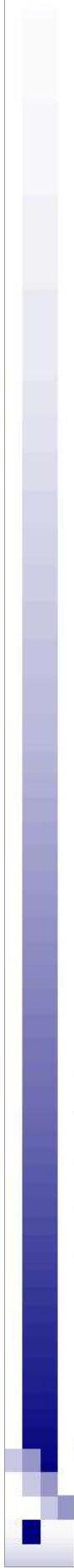


如何做到准确利用周期性进行处理？

如何快速完成处理（例如CPU处理可能会导致延误）

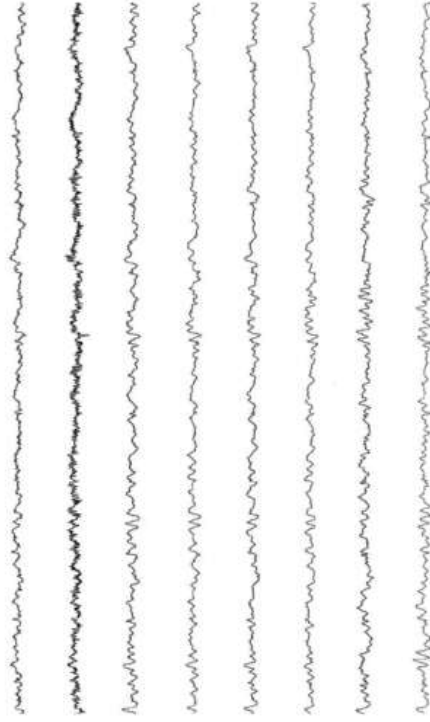
2024-9-10

11



典型讯号的范例-4

- 脑波图 (EEG-electroencephalogram) 讯号 – 表示由数十亿个脑神经元活动所产生的电性活动。



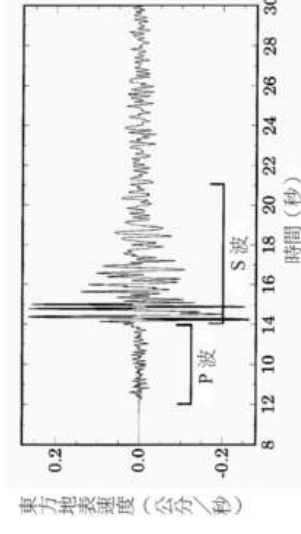
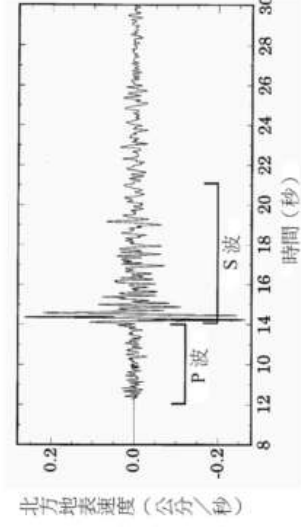
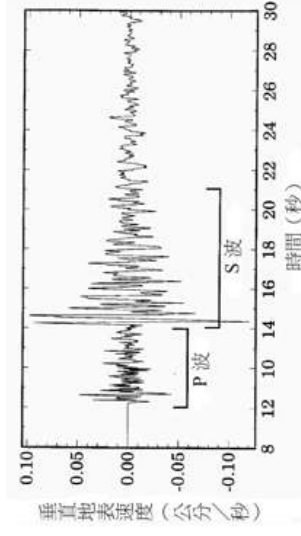
这个例子（脑波分析）和后面的例子（地震波）
一个核心问题就是
噪声>> 信号本身的强度，即信号/噪声比太小。
处理这样的信号，是DSP的“本职工作”

2024-9-10

12

典型讯号的范例-5

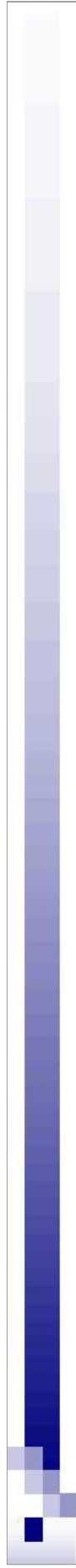
- 地震讯号 – 由地震、火山爆发或地底爆炸造成岩石活动所产生的讯号。
- 地层活动产生三种类型的弹性波，会由活动源 (source) 朝每一个方向传播到地球的每一个地方。



如何从浩如烟海的信号中分析出地震波，甚至预测地震波，是DSP+PR (Pattern recognition) 的巨大挑战。其原因就在于背景噪声的过滤 (滤波)

2024-9-10

13



典型讯号的范例-6

- 黑白 (black and white) 图片 – 将明亮度 (intensity) 以两个空间坐标的函数来表示。



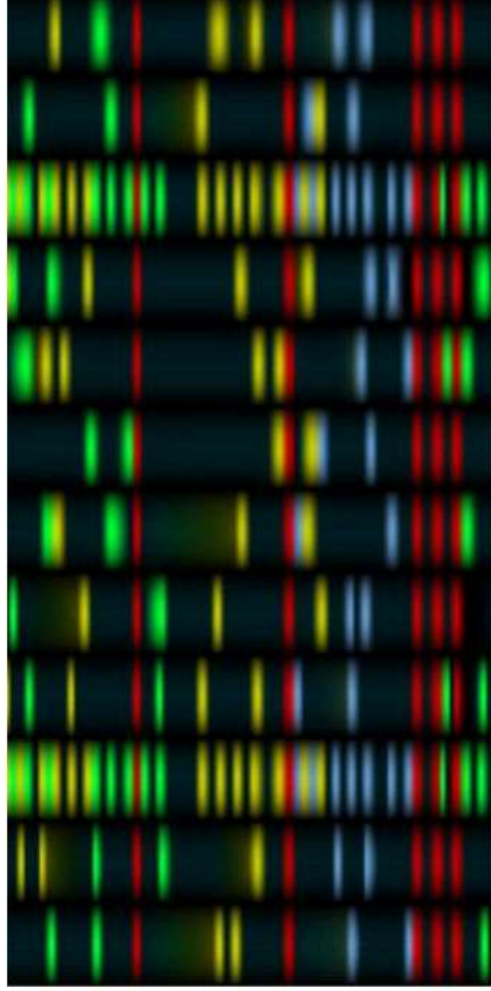
$I(x,y)$

2024-9-10

14

典型讯号的范例-7

- 跨界的典型信号 CT DNA
- 每一纵列只有3-4个用来代表DNA变化



经典的生物信号之一

2024-9-10

15

典型讯号的范例-9

- 视讯 (video) 讯号 – 包含一连串的影像 (或称像格, frame), 是一个包含时间及二维空间坐标的三变量函数。



2024-9-10

16

时域数字信号处理 (2)

从模拟信号到数字信号

2024-9-10

17

信号的分类(章节1.5 拓展)

■ 除了简单的讨论模拟信号

模拟信号(analog signal):

数字信号(digital signal):

量化信号(quantized signal):

离散信号(discrete signal):

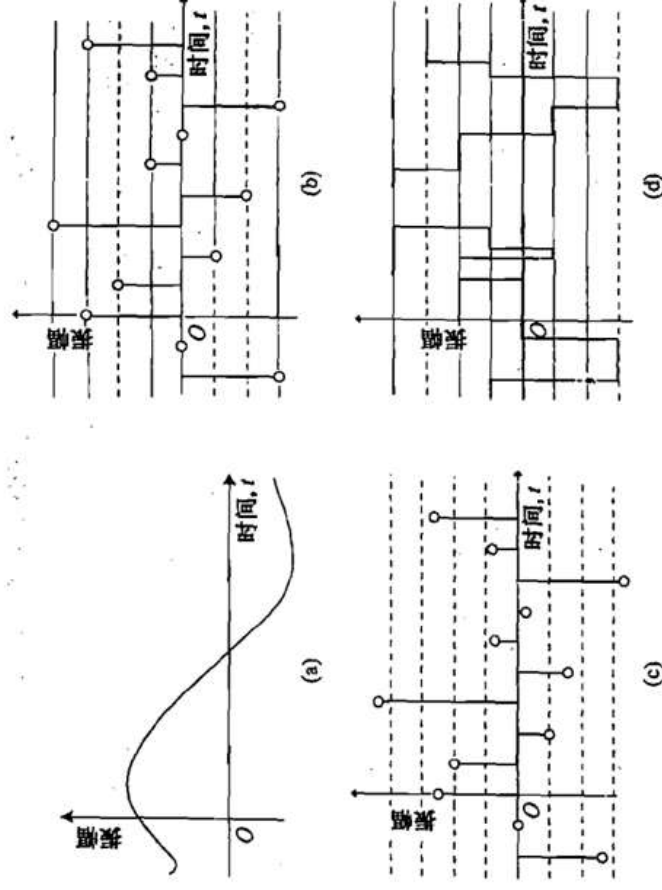


图 1.1 (a)模拟信号;(b)数字信号;(c)抽样数据信号;(d)量化矩形窗信号

2024-9-10

18



信号的分类

- 模拟信号(analog signal):
 - X,Y轴都是连续值的信号, 来自外界收集和用于设备交互
- 数字信号(digital signal):
 - X, Y轴都是离散值的信号, 用于DSP高速、便捷处理
- 量化信号(quantized signal):
 - Y轴是离散值的信号, 进行过Y轴数据编码, 提高数据处理能力, 抗噪等。
- 离散信号(discrete signal):
 - X轴是离散值的信号, 由采样生成, 是DSP的核心内容。

2024-9-10

19

量化信号的说明

- 量化（二进制编码 + 取整）的方法：
 - 对于连续实数进行二进制处理（四舍五入）
- 对于Y轴进行取整可以：
 - 表述更准确：非量化信号-使用信号强度表
 - 带来的好处：抗噪、低功耗、穿透率高
 - 量化是数字化的基础
- 为什么我们看到的量化/数字信号都是
 - 数据进行了0-1归一化→精度的概念

变量 - y

Y X

230399x2 double

	1	2	3
1	0	2.1809e-11	
2	0	1.2093e-08	
3	0	1.3570e-10	
4	0	-8.2420e-09	
5	0	2.1156e-10	
6	0	-2.5855e-08	
7	0	1.5744e-10	
8	0	-3.4930e-08	
9	0	-5.5867e-11	
10	0	-3.2466e-08	
11	0	-3.6956e-10	
12	0	-1.9281e-08	
13	0	-6.5249e-10	
14	0	2.7183e-10	
15	0	-7.5343e-10	

命令窗口

不熟悉 MATLAB? 请参看有关性速入口的资源。

2024-9-10

离散信号的说明

- DSP研究更关心的是X轴的离散取值

- 采样: $y = x(t)$ 中的 t 按照 N 点/每秒 进行记录 (采样率), 得到

$$x(t) \rightarrow x(n * \text{采样周期}) = x(n)$$

- $x(n)$ 中的 n 是没有单位的, 表示采样的第几个点

- 信号收集与真实的误差, 是受采样率决定的, 这是DSP技术的核心问题与瓶颈

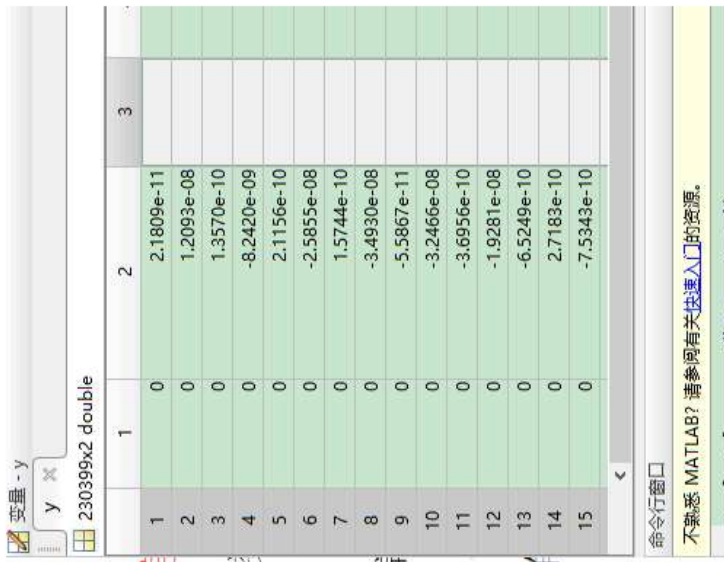
- 采样率越高, 需要处理的点越多, 则显然保真率 (fidelity) 越高, 但处理压力也越大!

2024-9-10

21

离散信号 VS. 量化信号

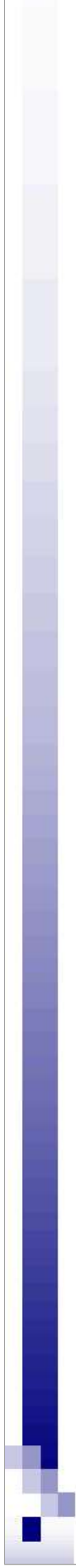
- 数字信号处理研究更关心的离散信号
- 在后续工作中，我们很多时候不加分辨的讨论离散信号
 - 原因1，表示方式：理想数字信号应该是二进制编码好的整数，在忽略码率的情况下，数字信号与离散信号一样。
 - 原因2，技术关注点：对于Y轴进行编码，使用的信道/信号源编码可以使用不同的Y轴编码，但是对于DSP处理没有额外影响
 - 原因3，影响不同：Y轴编码率不同，信号只是“清晰度”不同的信号会变成另一个信号



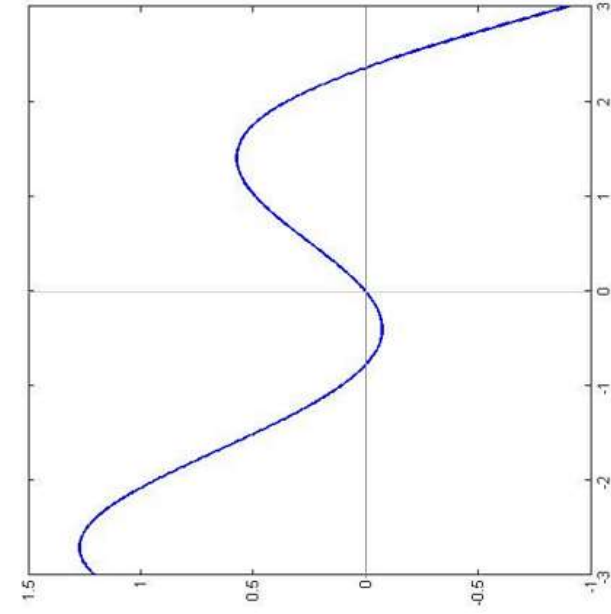
	1	2	3
1	0	2.1809e-11	
2	0	1.2093e-08	
3	0	1.3570e-10	
4	0	-8.2420e-09	
5	0	2.1156e-10	
6	0	-2.5855e-08	
7	0	1.5744e-10	
8	0	-3.4930e-08	
9	0	-5.5867e-11	
10	0	-3.2466e-08	
11	0	-3.6956e-10	
12	0	-1.9281e-08	
13	0	-6.5249e-10	
14	0	2.7183e-10	
15	0	-7.5343e-10	

命令窗口
不熟悉 MATLAB? 请参阅有关快速入门的资源。

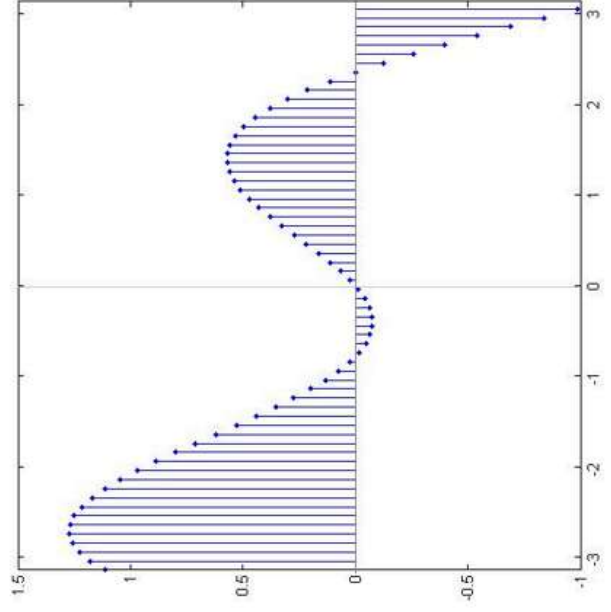
2024-9-10



模拟（连续）信号和数字（离散）信号的图像表示



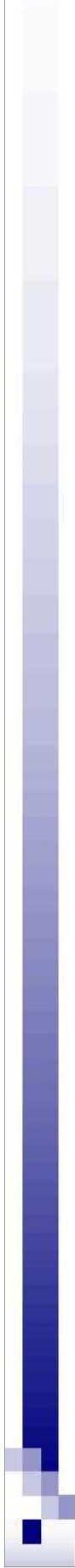
某一连续信号



对应数字信号

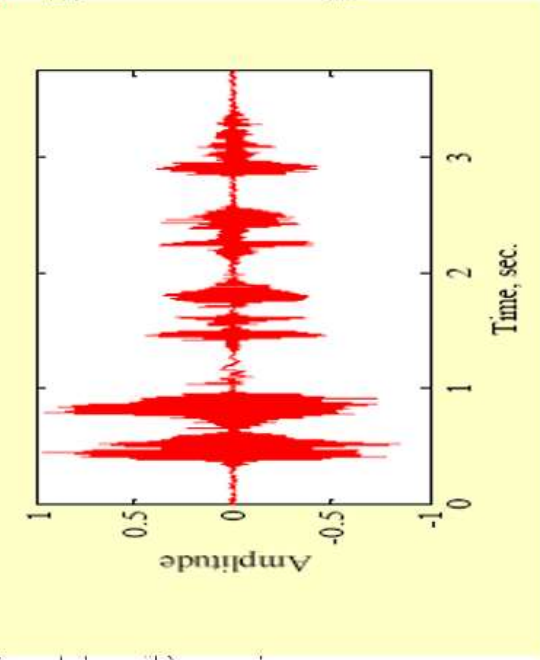
2024-9-10

23



数学上看：模拟信号vs. 数字信号（1）

在通信系统中，信号在传输过程中会受到各种干扰，导致信号失真。为了恢复原始信号，需要进行信号处理。



信号处理

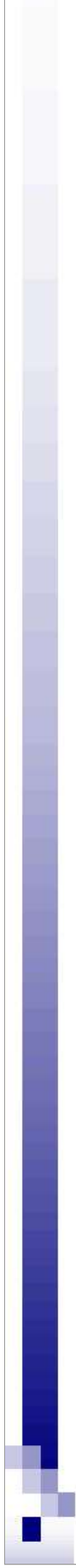


边缘检测，甚至



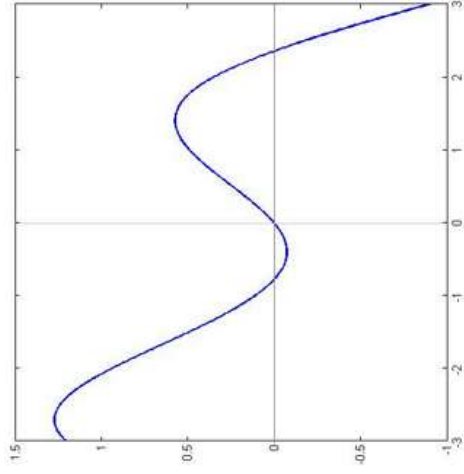
2024-9-10

24



数学上看：模拟信号vs. 数字信号（2）

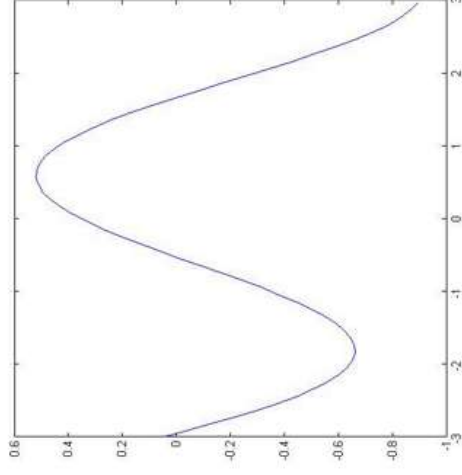
■ 我们以前面的一维信号为例



$$f = \frac{1}{2} \sin \left(t + \frac{\pi}{4} \right) \cdot t$$

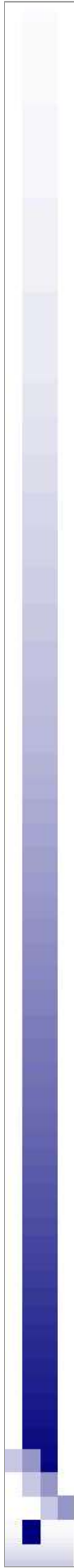
作为模拟信号求导数

$$f = \frac{1}{2} \sin \left(t + \frac{\pi}{4} \right) + \frac{1}{2} \cos \left(t + \frac{\pi}{4} \right) \cdot t$$



2024-9-10

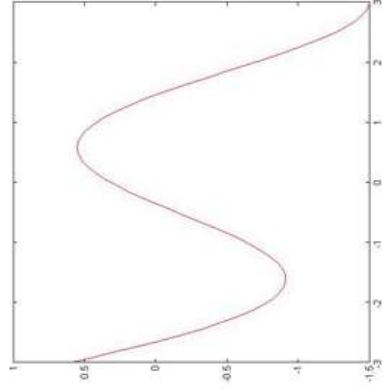
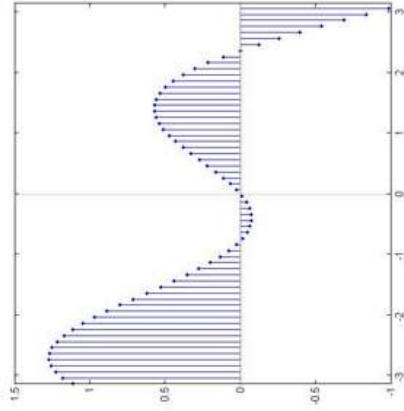
25



数学上看：模拟信号vs. 数字信号（3）

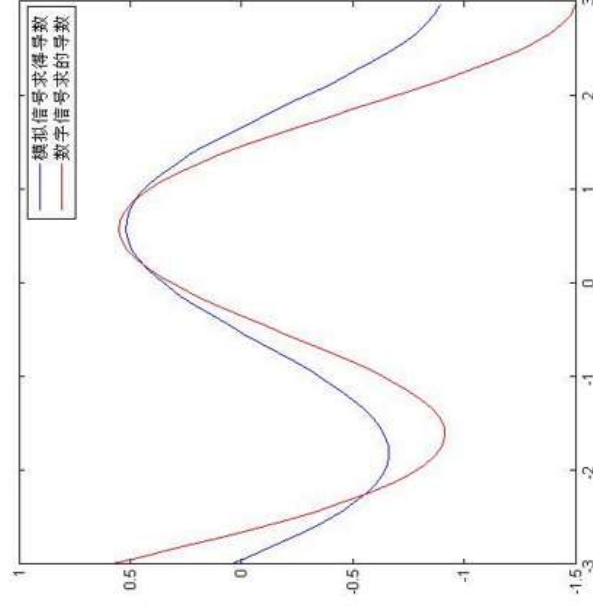
- 当把它数字化，根据导数定义
- 该信号，我们最小单位为0.1，那么以左导数为

$$f'_{left} = \frac{f(t) - f(t - \Delta t)}{\Delta t}$$



每个点的值，减去左边的值，再除以0.1

2024-9-10



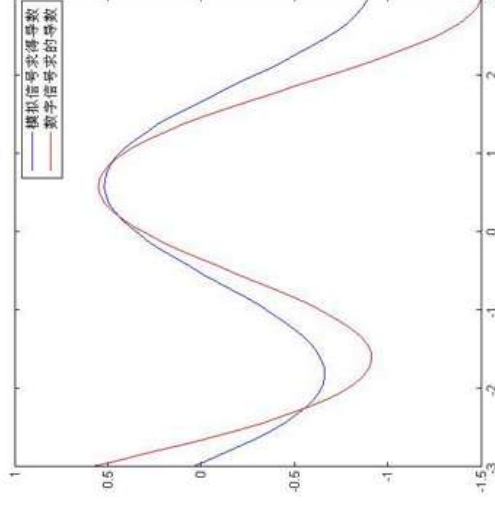
比较一下

26

单选题 1分

我们会在后面在对数字信号的求导在做进一步的讨论，现在有一个问题，为什么右面图的模拟信号和数字信号求导不一致？

- ☐ A 数字信号本来就是模拟信号不同
- ☐ B 难免的系统误差
- ☐ C 和 Δt 有关
- ☐ D 和 $f(t)$ 信号自身有关
- ☐ E 和左右导数有关



2024-9-10

27

从模拟信号进化到数字信号（4）

- 数字信号的表现能力更强，且设计简单
 - 前面例子中，模拟信号需要复杂的数学推导，要考虑不同的数学模型和相应的电路设计——复杂！！
 - 而数字信号，只需要一个相应的数字加减，就可以完成上面的过程。
- 模拟电路需要记录电压和电流，反过来数字电路只传导0，1两种信息
 - 模拟信号容易衰减，需要放大，故此，需要大量的放大器来实现信号放大（功率放大器）。
另一方面，放大信号会引入其它干扰。
 - 而数字信号只要传输0，1两个状态就可以了，简单

2024-9-10

28

从模拟信号进化到数字信号（5）

- 故此，数字信号具有
 - 1) 抗干扰能力强
 - 2) 功(率消)耗低
 - 2) 电路设计简单，集成度高
 - 3) 后期处理方便

2024-9-10

29



DSP 的限制

- 较为复杂的控制
 - 需要额外的设备进行数字系统的自动监控。
- 运作频率范围上的限制
 - 技术上，**频率**范围受限于其最大**计算能力**。
- 在处理模拟信号时所需的额外复杂度
 - A/D 和 D/A 转换器将增加系统的复杂度。

2024-9-10

30

时域数字信号处理 (3)

DSP的常见应用* (选讲)

2024-9-10

31



DSP 的应用范例(章节1.4 拓展)

- 离散多音调传输 (Discrete multi-tone transmission)
- 行动电话
- 数字声音合成
- 信号编码 & 压缩 (coding & compression)
- 信号增强 (enhancement)

2024-9-10

32

非对称数字用户回路 (ADSL)-1

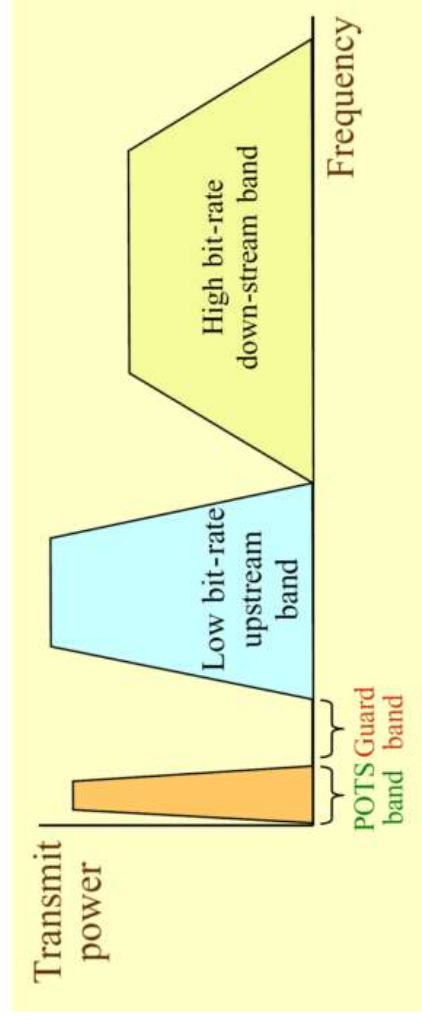
- 属于区域传输系统，设计用于双绞线上同时提供三种服务：
 - 以最高 9 Mb/s 位率进行数据下载传输（数据朝向使用者）。
 - 以最高 1 Mb/s 位率进行数据上传传输（数据远离使用者）。
 - 原始电话服务 (POTS)。
- 以此为例，我们聊一聊分频通讯——加深对于频率的了解
 - 同一根双绞线可以同时上传、下载和通话。
 - 天空中的无线电可以同时传播很多信号（2G-5G）
 - 现代通讯的基础

2024-9-10

33

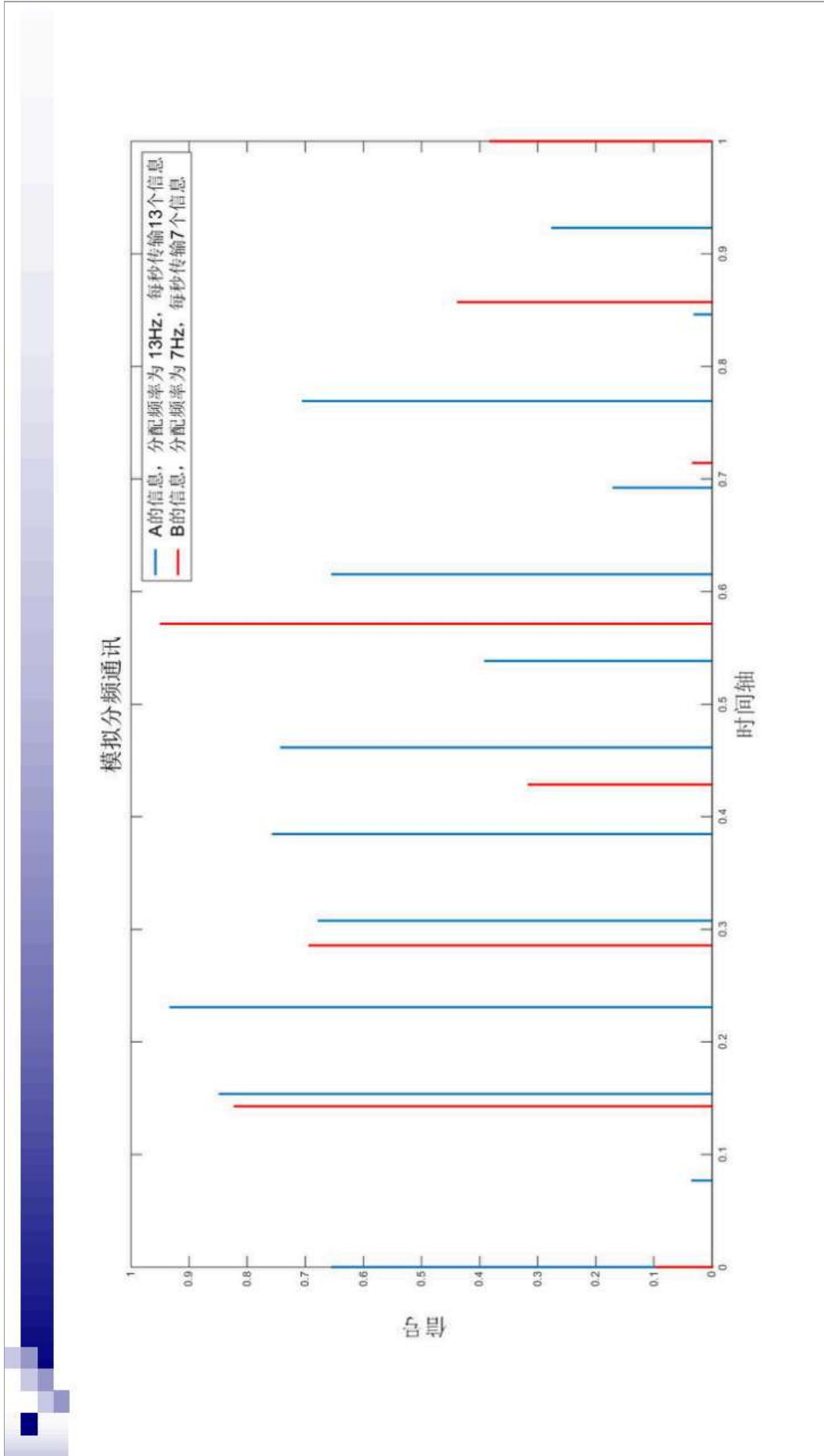
非对称数字用户回路 (ADSL)-2

- 一个分频的例子：分频多任务 (FDM) 架构的非对称数字用户回路，其频谱分配如下



2024-9-10

34



5G建设速度跟不上？美国要对中低频段下手了

人民邮电报

发布时间：19-07-14 10:54 | 人民邮电报

Verizon CEO：2020年将采用低频段在全国部署5G

暴走通信

发布时间：02-15 11:46

美国发布5G高频段频谱新规划，中国该如何布局5G网络？

Eleanore 发布于 2年前 (2018-07-12) | 分类：智能终端资讯 / 资讯 | 来源：通信世界

美国发布5G高频段频谱新规划，中国该如何布局5G网络？

近月上市数量超

《 时域数字信号处理（1） 》

- 36/54页 -

雨课堂
Rain Classroom



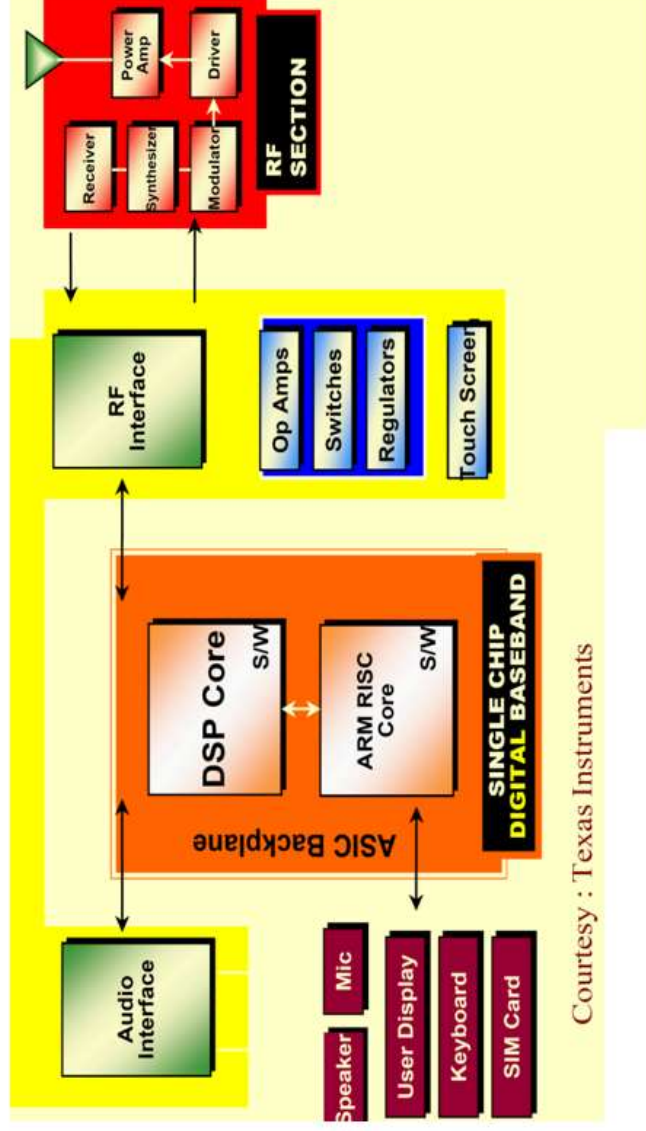
离散多音调传输 (DMT)

- 使用离散多音调传输以达成ADSL与VDSL的优点：
 - 传输位率最大化 (maximization) 的能力。
 - 对传输线路条件改变的适应性。
 - 降低对传输线路条件的敏感度。

2024-9-10

37

行动电话方块图



2024-9-10

38

离散多音调传输 (DMT)

- 实现非对称数字用户回路(asymmetric digital subscriber line, ADSL)与超高速数字用户回路(very-high-rate digital subscriber line, VDSL)的核心技术。
- 非常接近：正交频多任务(Orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM)。

2024-9-10

39



数字声音合成-1

- 四种音乐声音的合成方法：
 - 波表合成 (wavetable synthesis)
 - 频谱合成 (spectral synthesis)
 - 非线性合成 (nonlinear synthesis)
 - 物理模型合成 (synthesis by physical modeling)

2024-9-10

40

数字声音合成-2

■ 波表合成法

- 将记录后或合成后的音乐存储在内部存储器中，在需要时加以播出。
- 播放工具包括在重制过程中声音变化的各种技术，例如音调位移 (pitch shifting)、循环 (looping)、封包 (enveloping) 和滤波 (filtering)
- 范例：Giga sampler 💡

2024-9-10

41

数字声音合成-3

■ 频谱合成法

- 从频域模型来产生声音。
- 声音信号被表示成各种时变 (time-varying) 振幅基底函数的加成。
- 实作上通常包括加成性 (additive) 合成、减法性 (subtractive) 合成、及粒状细致性 (granular) 合成。
- 范例: Kawai K500 Demo 💡

2024-9-10

42

数字声音合成-4




■ 非线性合成法

- 频率调变方法：在弦波基底函数中形成时间相关的相位项。
- 在合成器及 PC 音讯卡中常被使用的一种较不昂贵方法。
- 范例：Variation modulation index complex 法则 (Pulsar) 💡

2024-9-10

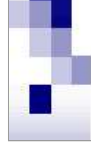
43

数字声音合成-5

- 物理模型合成法
 - 建构声音形成的模型。
 - 利用偏微分方程来描述声带的主要振动结构。
 - 大部分的方法着重在描述固体或空气中波形传递的波方程式。
- 范例： (CCRMA, Stanford)
 - 尼龙弦的吉他 
 - 马林巴琴（木琴） 
 - 次中音萨克斯管 

2024-9-10

44



信号编码 & 压缩

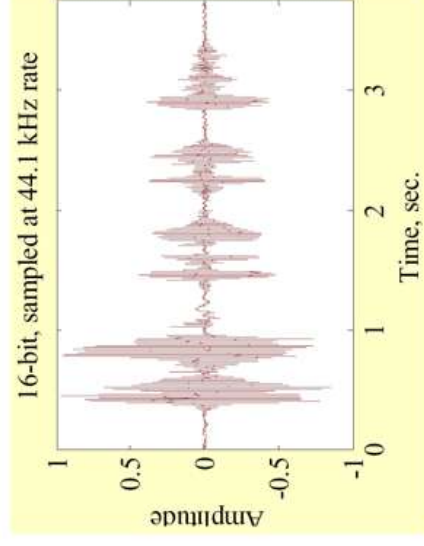
- 探讨语音或视觉信号在储存与传输时有效的数字表示法，以供观看者与收听者一个最佳的质量。

2024-9-10

45

信号压缩范例-1

- 原始语音：
资料大小为 330,780 bytes



压缩语音 (GSM 6.10) 💡

取样率 22.050 kHz, 资料大小 16,896 bytes

压缩语音 (Lernout & Hauspie CELP 4.8kbit/s) 💡

取样率 8 kHz, 资料大小 2,302 bytes

2024-9-10

46

信号压缩范例-2

■ 原始音乐

音讯格式: PCM 16.000kHz, 16 Bit
(资料大小: 66206 bytes)

■ 压缩音乐💡

音讯格式: GSM 6.10, 22.05kHz
(资料大小: 9295 bytes)

Courtesy: Dr.A. Spanias

2024-9-10

47

信号压缩范例-3



Original Lena
8 bits per pixel



Compressed Image
Average bit rate - 0.5 bits per pixel

2024-9-10

48



信号增强

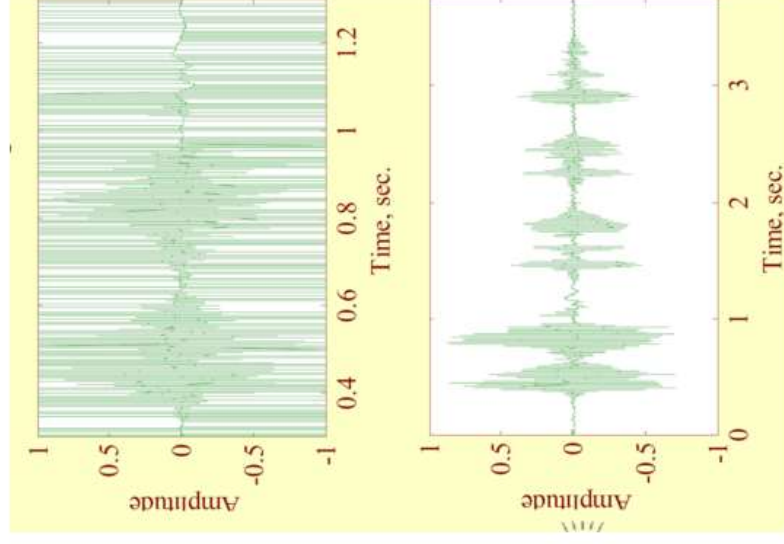
- 目的：强化特定信号特征，提供观赏者与收听者最佳质量。
- 对于声音信号，其算法包含移除背景噪声和干扰。
- 对影像或视讯信号，其算法包含对比增强、锐化和噪声移除。

2024-9-10

49

信号增强范例-1

- 噪声语音信号
(10% 脉冲噪声,
impulse noise)



- 噪声去除后的语音

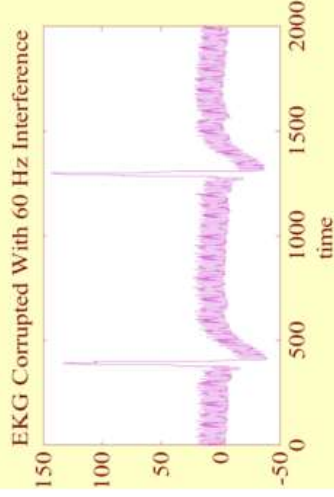


2024-9-10

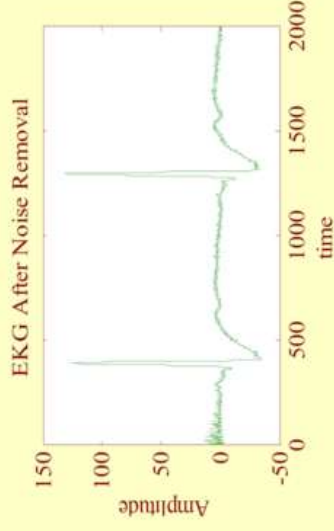
50

信号增强范例-2

EKG corrupted with
60 Hz interference



EKG after filtering with
a notch filter

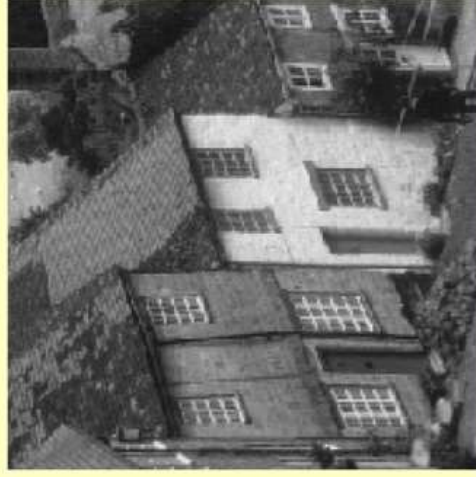


2024-9-10

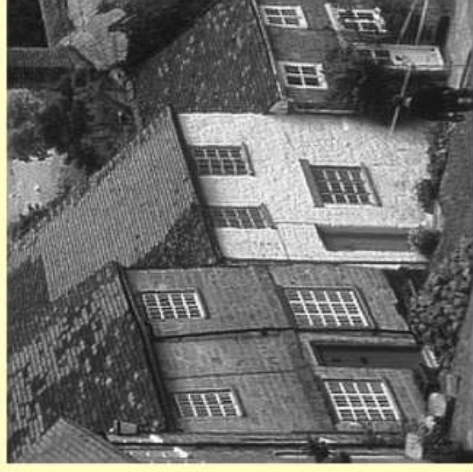
51

信号增强范例-3

■ 原始影像与对比增强结果



Original



Enhanced

2024-9-10

52

信号增强范例-4

■ 原始影像与对比增强结果



Original



Enhanced

2024-9-10

53

信号增强范例-5

■ 噪声影像与噪声去除结果



20% pixels corrupted with
additive impulse noise



Noise-removed version

2024-9-10

54