

盲信号处理

Blind Signal Processing

陆文凯

清华大学自动化系

Email:lwkmf@mail.tsinghua.edu.cn

关于本门课程

- ◆ 提供一个对盲信号处理理论及应用的介绍
 - 介绍一些基本概念
 - 介绍一些典型算法
 - 讨论一些应用实例
 - 信号处理的一些基本技巧和经验
- ◆ 适合对象
 - 工程类研究生

◆ Why BSP

— 盲信号处理是一个理论和应用上不断创新的研究领域，并被成功地应用于不同的领域（如各种图象处理，地震信号处理，通信信号处理，生物信号处理，语音信号处理等）。

◆ 课程目标

— 系统的掌握盲信号处理的基本概念，理论和部分典型算法，具备跟踪盲信号处理的发展前沿和在该领域开展独立研究能力

◆ 预备知识

— 信号与系统，线性代数，数值分析，优化原理

◆ 考核方式

— 平时作业+综合作业
每次平时作业100分，晚交最多80分。
综合作业200分

◆ 课程主页（网络学堂）

— 提供所有电子文档，作业通知

参考书

1. Andrzej Cichocki, and Shun-ichi Amari, Adaptive blind signal and image processing: learning algorithms and applications, John Wiley & Sons, Ltd. 2002.
2. Stephen Roberts, and Richard Everson, Independent component analysis: principles and practice. Cambridge University Press, 2001.
3. Simon Haykin, Adaptive filter theory, Prentice-Hall, Inc., 1996.
4. 邹谋炎, 反卷积和信号复原, 国防工业出版社, 2001。
5. 张贤达, 保铮, 通信信号处理, 国防工业出版社, 2000。
6. 李衍达, 常Tong, 信号重构理论及其应用, 清华大学出版社, 1991。
7. 张贤达, 时间序列分析—高阶统计量方法, 清华大学出版社, 1996。

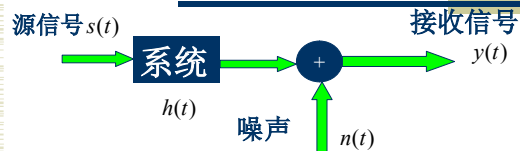
其他文献

- ◆ 图书馆的电子文档库
IEEE/IEE
- ◆ 网上文档
Blind signal processing, Blind signal separation, Blind deconvolution, Image deblurring, Independent Component Analysis ...

课程内容

- ◆ 盲信道估计/盲反卷积 (盲反褶积)
Blind channel estimation/Blind deconvolution
—通信, 数字电视, 地震信号, 图像...
- ◆ 盲信号分离
Blind signal separation
—生物信号, 声音信号
- ◆ 信号重构
Signal reconstruction
—语音, 图像, 超分辨率

盲信道估计/盲反卷积 (Blind Channel Estimation / Blind Deconvolution)

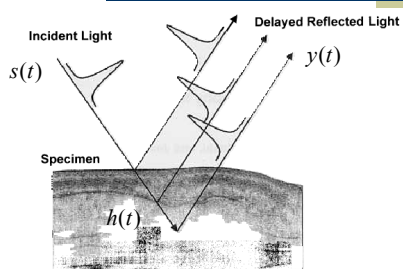


$$y(t) = s(t) * h(t) + n(t)$$

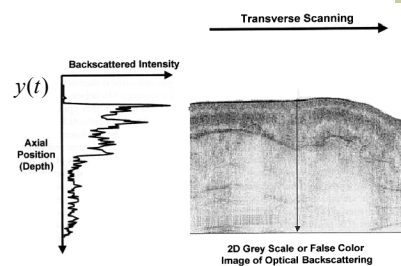
卷积模型: $y(\omega) = s(\omega)h(\omega) + n(\omega)$

$$Y = SH + N$$

Optical Coherence Tomography (OCT)



OCT



图象模糊



原始图象



PSF



模糊后图象

信道估计/反卷积

$$Y = SH + N$$

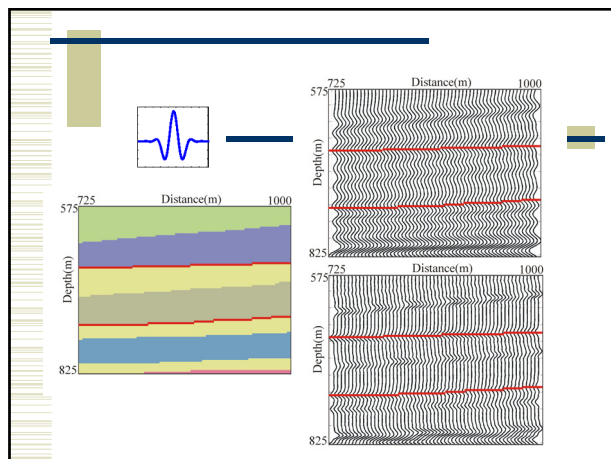
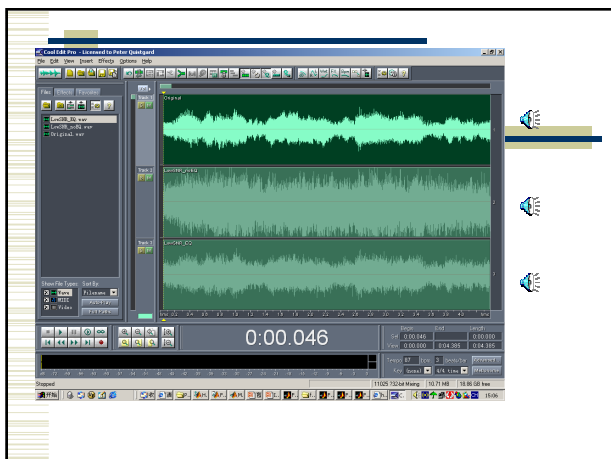
信道估计: \hat{Y} 、 S 已知, 求 H

$$H = Y / S + N / S$$

反卷积: \hat{Y} 、 \hat{H} 已知, 求 S

$$\hat{S} = \hat{Y} / \hat{H} + N / \hat{H}$$

问题: N



优化理论解决噪声问题

$$E = \|Y - SH\|$$

最小二乘解 (LS)

$$H = (S^T S)^{-1} S^T Y$$

阻尼最小二乘解

$$H = (S^T S + \lambda I)^{-1} S^T Y$$

盲信道估计/盲反卷积

$$Y = SH + N$$

盲信道估计: Y 已知, 求 H 、 S

盲反卷积: Y 已知, 求 S 、 H

问题: 多解性, 其他先验知识

先验知识

- 不同的应用 (信号) 会使用不同的先验知识
- 统计性的先验知识: 二阶或高阶统计量可以估计, 输入信号、系统具有某种统计性质, 输入信号、系统可以用某种数学模型表示。
 - 在地震信号反褶积中, 假设地球反射系数是白噪声
 - 语音信号处理中, 假设可以使用线性预测模型 (LPC)
 - 图像去模糊处理中, 假设点扩散函数 (point-spread function, PSF) 可以用数学模型表示。
 - 通信信号中, 所传送的信号是有限状态的

先验知识

- ◆ 信号间的独立性
 - 信号和噪声是独立的
- ◆ 某种信号在时间或空间域上的有限性
 - OCT中的相干波长是有限长的
 - 通信信道是有限长的
 - 地震震源信号是有限长的
 - 图像处理中的PSF是有限支持域的 (Finite Support Region)

算法实现

- ◆ 利用先验知识和观测数据构造目标函数

$$E = \|Y - SH\| + C$$

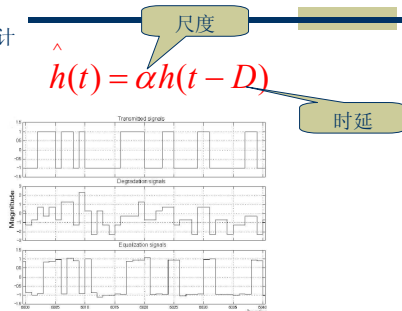
?
?
先验知识

- ◆ 优化方法的选择, 得到闭式解, 或迭代寻优

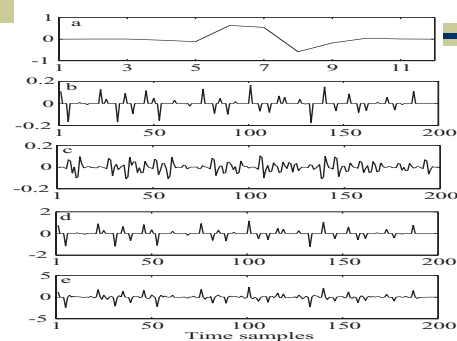
结果评价

盲反卷积/信道估计
的两个不确定性:

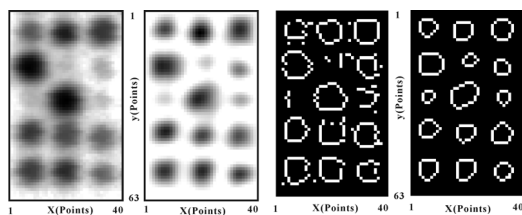
- 1、尺度
- 2、时延



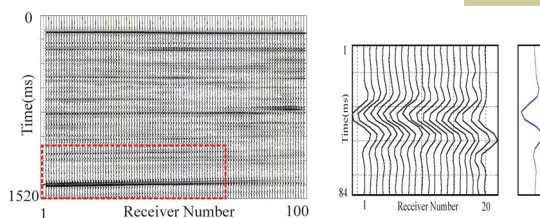
盲反卷积: 1D信号



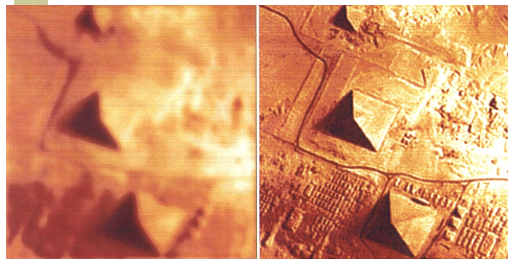
2D信号 (Microarray)



盲信道估计: 地震信号



其他一些精彩的实例



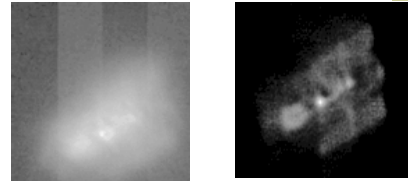
金字塔图象的反褶积

左: 原始模糊图象 右: 反褶积后的图象

Hubble 太空望远镜的图片

•600KM的高空轨道

•1.6M的地面望远镜观测

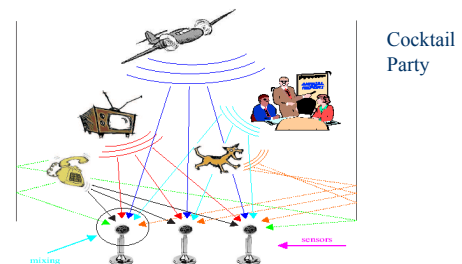


(一分钟的电影)

应用领域

- ◆ 石油勘探（地震信号处理）
- ◆ 通信信号处理
- ◆ 语音识别
- ◆ 光学相干成像（OCT）图象处理
- ◆ 遥感图象处理
- ◆ 基因芯片图象
- ◆ 天文图象
- ◆

盲信号分离（Blind Signal Separation）



多变量数据线性表达

- ◆ 统计学中的一个古老且未完全解决的问题
PCA, 因子分析 (Factor Analysis), 投影追踪 (Projection Pursuit)
- ◆ 信号处理
傅立叶变换、滤波器组、小波和小波包,
信号稀疏表达

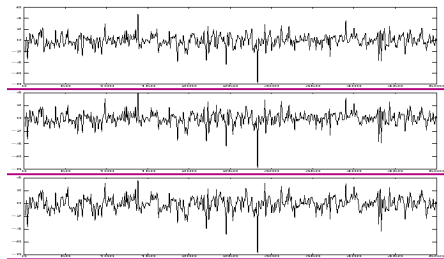
数学表达式为:

$$\text{基函数 } s_i(t) = \sum_j w_{ij} x_j(t)$$

$$\text{观测信号 } x_j(t) = \sum_i a_{ij} s_i(t)$$

$$i = 1, M \quad j = 1, N$$

独立成分分析 Independent Component Analysis (ICA)



$$\begin{aligned}x_1(t) &= a_{11}s_1(t) + a_{12}s_2(t) + a_{13}s_3(t) \\x_2(t) &= a_{21}s_1(t) + a_{22}s_2(t) + a_{23}s_3(t) \\x_3(t) &= a_{31}s_1(t) + a_{32}s_2(t) + a_{33}s_3(t)\end{aligned}$$

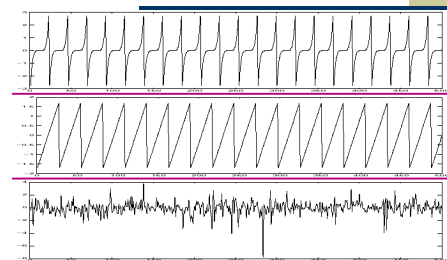
$$X = AS$$

观测信号 混合矩阵 源信号
↑ ↑ ↑
已知 未知 未知

盲信号分离问题

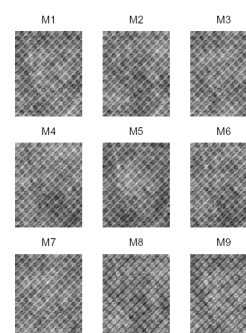
- ◆ 已知观测信号 x ，估计源信号 s
- ◆ 有无数的解，需要另外的约束条件
- ◆ 假设源信号 s 是非高斯分布的，且统计上相互独立
- ◆ ICA

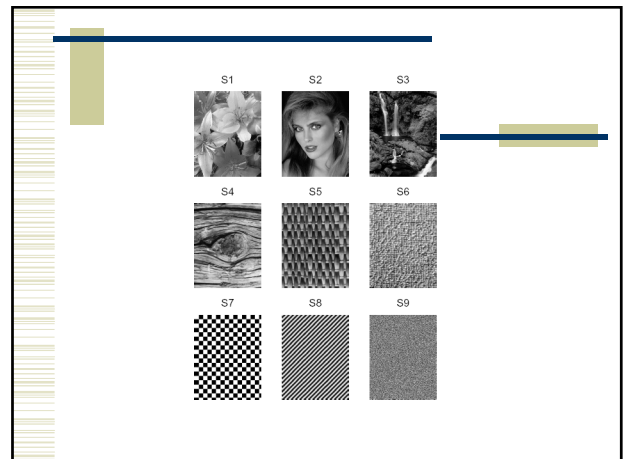
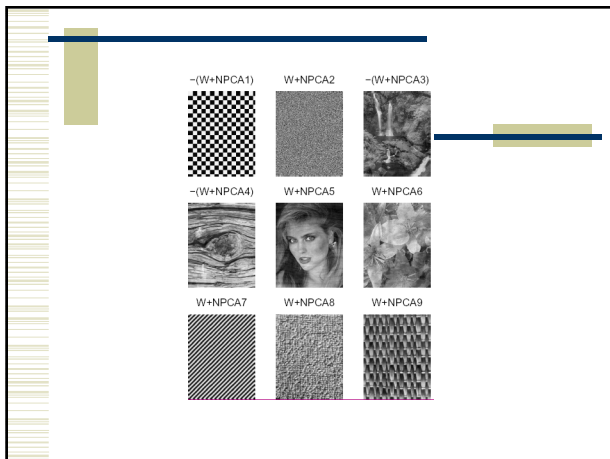
ICA解



ICA应用于图象

- ◆ 将图象按同一顺序转化为1维信号
- ◆ ICA





盲分离结果评价

- 任何盲分离算法具有以下两个不确定性：
 1. 尺度（能量）
 2. 排列顺序（语音分离，其他处理技术解决）

ICA原理

尽管混合矩阵 A 未知，但假设其可逆

$$\begin{aligned} s_1(t) &= w_{11}x_1(t) + w_{12}x_2(t) + w_{13}x_3(t) \\ s_2(t) &= w_{21}x_1(t) + w_{22}x_2(t) + w_{23}x_3(t) \\ s_3(t) &= w_{31}x_1(t) + w_{32}x_2(t) + w_{33}x_3(t) \end{aligned}$$

矩阵形式

$$S = WX$$

Diagram illustrating the matrix equation $S = WX$ with labels and status:

- S : 源信号 (Source signal), 未知 (Unknown)
- W : 分离矩阵 (Separation matrix), 未知 (Unknown)
- X : 观测信号 (Observed signal), 已知 (Known)

ICA原理

- 调节分离矩阵 W ，使估计得到的源信号尽可能相互独立。
- 独立等价非高斯性，即使估计得到的源信号尽可能远离高斯分布

目标函数

- ◆ 独立性
 - 最大似然目标函数 (Likelihood)
 - 最小互信息目标函数 (Mutual information)
 - 最大信息目标函数 (Information maximisation)
- ◆ 等价性
 - 需要源信号的概率分布函数 (pdf) 信息

目标函数

- ◆ 非高斯性
 - 基于高阶统计量的目标函数 (Higher order statistics, HOS)
 - 负熵 (Negentropy)
- ◆ 等价性
 - 不需要源信号的概率分布函数 (pdf) 信息

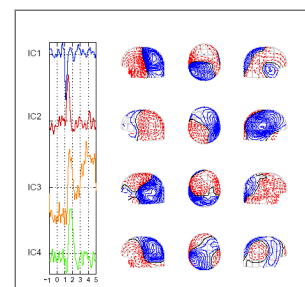
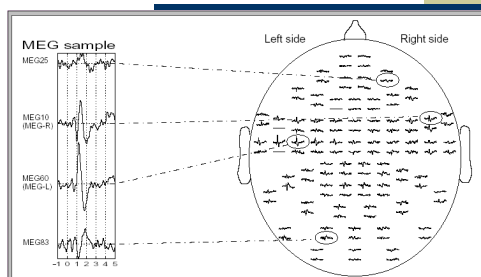
优化算法

- ◆ 梯度法 (Gradient)
- ◆ 定点优化 (Fixed point methods)

应用领域

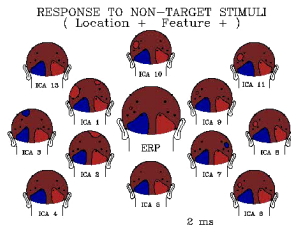
- ◆ 石油勘探 (地震波场分离)
- ◆ 通信信号处理 (多用户检测)
- ◆ 语音分离
- ◆ 生物信号分离
- ◆ 经济数据分析
- ◆ 图象分离
- ◆

脑磁信号分离



Event-related potentials (ERP)

- ◆ 和一个特定事件的相关联的脑电波 (EEG) 变化



信号重构 (Signal Reconstruction)

- ◆ 从观测信号中提出信息是信号处理中的一个重要研究内容
 - ◆ 信号重构是指：知道信号在不同域（时域，频域等）的取值，重构整个信号
- 重构条件（重构不是无条件的，从理论上证明，在何种条件下，利用部分信号值可以重构整个信号）
- 重构算法（如何利用部分信号值重构整个信号）

采样定理—一个信号重构的实例

- ◆ 时域采样定理
- 若一个信号 $s(t)$ 不含有高于 w 赫兹的频率成分，则它可由其等间隔的采样序列来唯一地重构，其条件是，采样间隔必须不大于 $1/(2w)$ 。

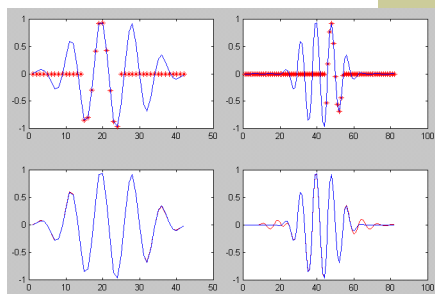
离散数字信号处理的基础

应用领域

- ◆ 信号压缩
- ◆ 噪声消除（利用信号信噪比高的成分重构信噪比低的部分）
- ◆ 图象去模糊（焦距不准，利用相位信息重构原图）
- ◆ 地震信号处理
- ◆ 语音信号处理
- ◆

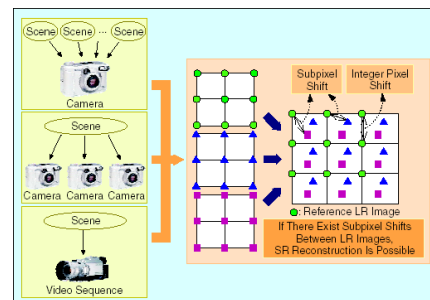
地震子波估计 (只知道部分时域、全部振幅谱)

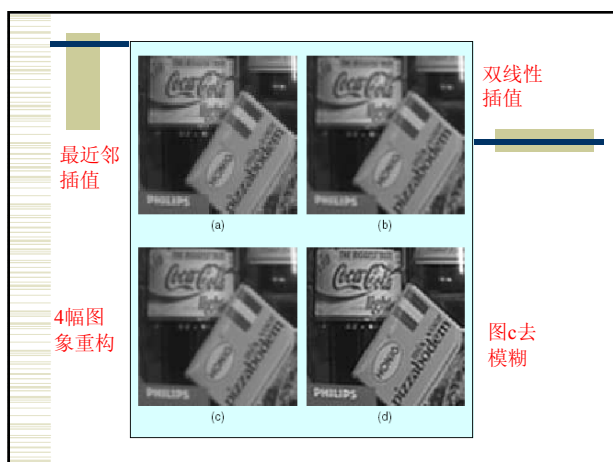
子波长度 41, 已知点数 10



子波长度 81, 已知点数 10

图象重构





资料来源

- ◆ Profs. Juha Karhunen and Erkki Oja at the Helsinki University of Technology
<http://www.cis.hut.fi/projects/ica/book/>
- ◆ ICA - CNL Overview:
http://www.cnl.salk.edu/~tewon/ica_cnl.html
- ◆ Sung Cheol Park; Min Kyu Park; Moon Gi Kang; Super-resolution image reconstruction: a technical overview , Signal Processing Magazine, IEEE , Volume: 20 Issue: 3 , May 2003, Page(s): 21 -36