



2020
北京

多媒体开启
MULTIMEDIA BRIDGE
TO A WORLD OF VISION

新视界

非线性声学回声消除技术

范展 华为云视频



目录

CONTENTS



2020
北京

01 什么是非线性声学回声

02 双耦合声学回声消除算法

03 实验结果分析

04 总结



2020
北京

什么是非线性声学回声

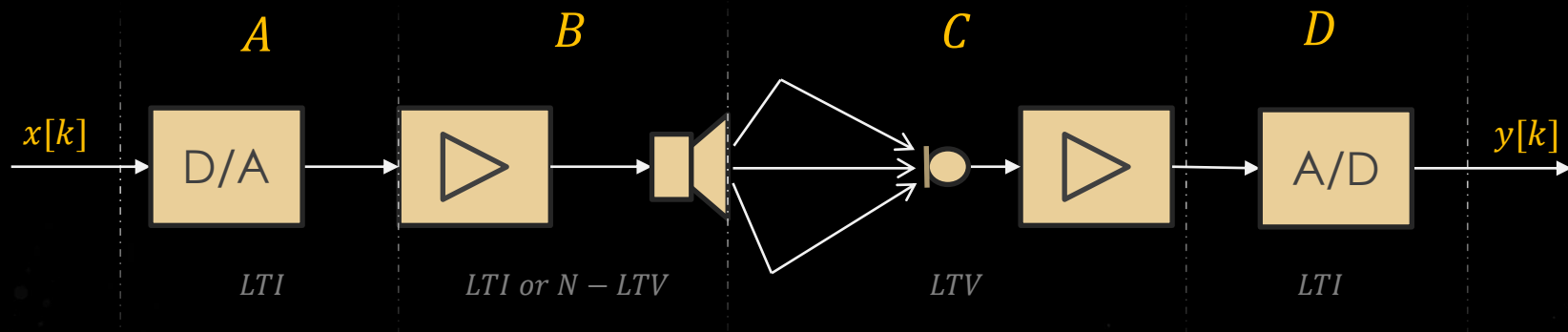
- 什么是非线性声学回声
- 非线性回声产生原因
- 非线性回声研究现状
- 技术难点

PART 1

1. 什么是非线性声学回声？



2020
北京



A: 线性时不变

B: 线性时不变 or 非线性时变

C: 线性时变

D: 线性时不变

2. 非线性声学回声产生的原因



2020
北京

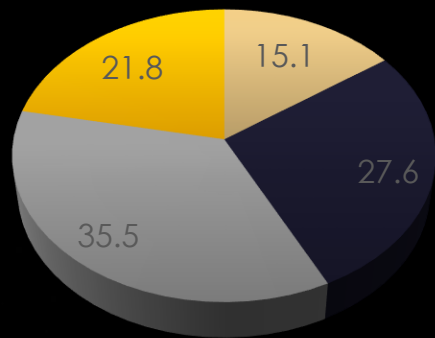
原因1：声学器件的小型化与廉价化

原因2：声学结构设计不合理

3. 手机声学特性调研



2020
北京



■ 线性度好 ■ 线性度一般
■ 线性度较差 ■ 线性度极差

- 针对市面上**317**款手机机型的声学特性进行调研
- **超过半数**机型的声学特性不够理想
- 导致回声消除亦不理想（漏回声、双讲剪切）

4. 非线性声学回声消除技术研究现状



2020
北京

Showing 1-25 of 3,402 for (((("All Metadata":Echo Cancellation) OR "All Metadata":Echo Canceling) OR "All Metadata":Echo Suppression) x

▼ Filters Applied: 1920 - 2021 x

☐ Conferences (2,444)

☐ Journals (892)

☐ Magazines (40)

☐ Early Access Articles (15)

☐ Books (7)

☐ Standards (4)

“声学回声消除”
3402篇文献

Showing 1-25 of 254 for

(((("All Metadata":Nonlinear echo cancellation) OR "All Metadata":Nonlinear acoustic echo cancellation) NOT "All Metadata":nonlinear residual echo suppression) NOT "All Metadata":array) x

▼ Filters Applied: 1920 - 2021 x

☐ Conferences (187)

☐ Journals (63)

☐ Magazines (3)

☐ Early Access Articles (1)

“非线性声学回声消除”
254篇文献

- 数据来自 IEEE Digital Library, 共有**5,273,000+**篇文献
- “声学回声消除” 文献数为**3402**
- “非线性声学回声消除 ” 文献数为**254**

5. 非线性声学回声消除的技术难点



2020
北京

	线性	非线性
系统传递函数	缓慢时变	快变、突变
优化模型	完备的线性优化模型	缺少有效模型支撑
强混响问题	存在	存在
延时跳变问题	存在	存在
啸叫问题	存在	存在
双讲问题	存在	存在



2020
北京

双耦合声学回声消除算法

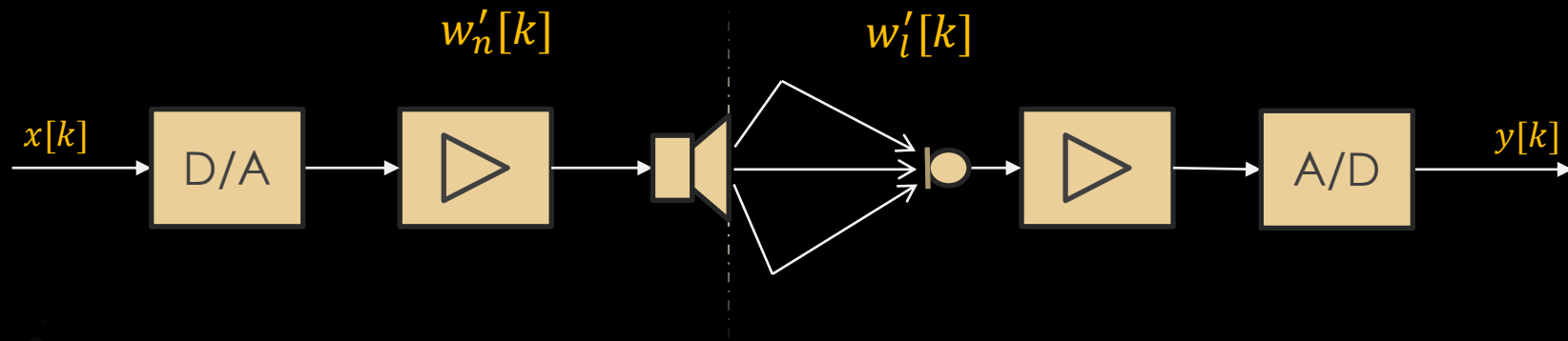
- 非线性声学回声系统建模
- 构建优化准则
- 模型求解

PART 2

1. 非线性声学回声系统建模



2020
北京



$$y[k] = x[k] * w'_n[k] * w'_l[k] + z[k]$$

- $w'_n[k]$ ——非线性回声路径传递函数
- $w'_l[k]$ ——线性回声路径传递函数
- $z[k]$ ——近端语音+背景噪声

➤ 模型化简



2020
北京

$$y[k] = x[k] * w'_n[k] * w'_l[k] + z[k]$$



- **假设** $w'_n[k]$ 可分解为非线性系统 $w'_{nn}[k]$ 与线性系统 $w'_{nl}[k]$ 的组合, 即

$$w'_n[k] = w'_{nn}[k] + w'_{nl}[k]$$

$$y[k] = x[k] * (w'_l[k] * w'_{nn}[k] + w'_l[k] * w'_{nl}[k]) + z[k]$$



- **令** $w_n[k] = w'_l[k] * w'_{nn}[k]$, $w_l[k] = w'_l[k] * w'_{nl}[k]$

$$y[k] = x[k] * (w_l[k] + w_n[k]) + z[k]$$

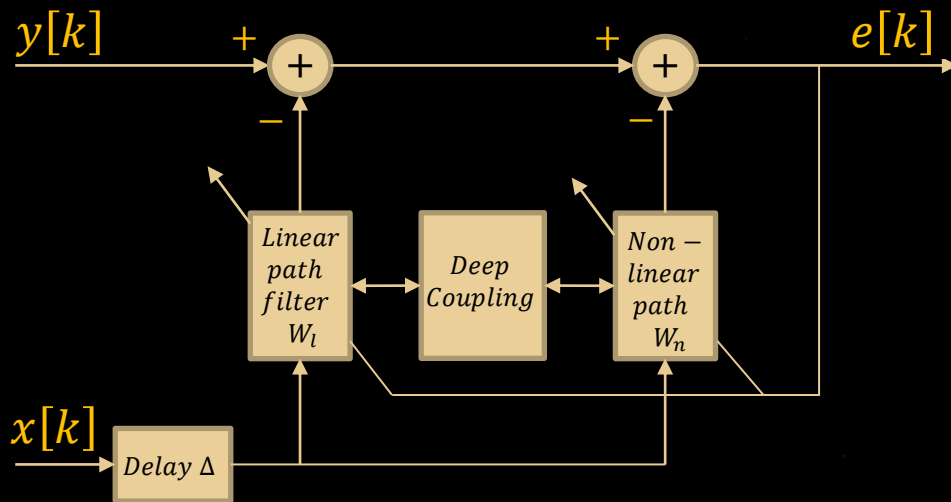
线性回声路径

非线性回声路径

2. 双耦合自适应滤波器



2020
北京



$$e[k] = y[k] - x[k - \Delta] * (w_l[k] + w_n[k])$$

- 构建优化准则
- 求解滤波器权系数 w_l 和 w_n
- 构建耦合机制

3. 双耦合滤波器设计(1)——构建优化准则



2020
北京

➤ 非线性声学回声特性分析

$$f_{x,y}(T) = E \left\{ \frac{\sum_{d=k-T/2}^{k+T/2} x[d] y^H[d] e^{j\varphi}}{\sqrt{\sum_{d=k-T/2}^{k+T/2} |x[d]|^2} \sqrt{\sum_{d=k-T/2}^{k+T/2} |y[d]|^2}} \right\}$$

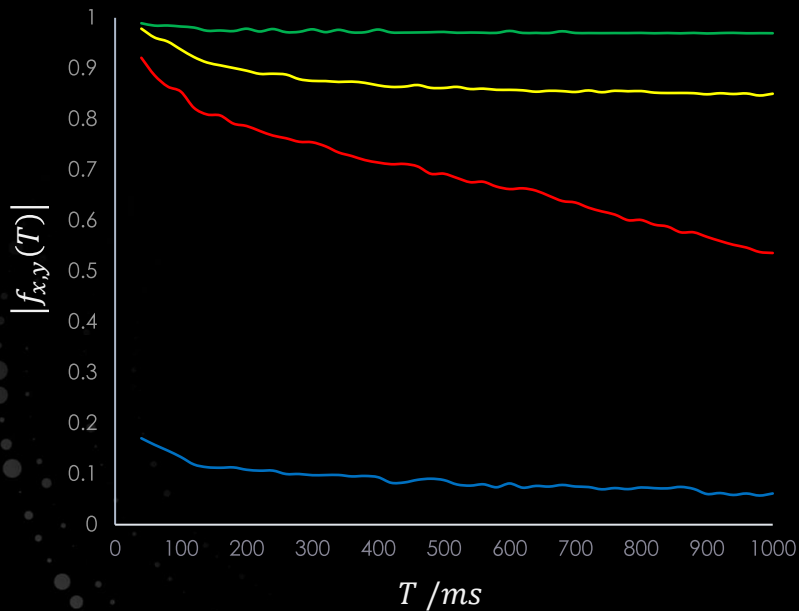
- T ——短时窗长
- φ ——相位校正因子

短时相关度



➤ 短时相关度比较

短时相关度分析



图例说明

- 绿色数据对应的线性度最好
- 黄色数据有较弱的非线性失真
- 红色数据有较强的非线性失真
- 蓝色数据是信号与噪声短时相关度

结果分析

- “短时相关度”能够客观反映声学系统的回声线性度特性
- 非线性失真严重的系统，其在短时观测窗内（如 $T < 100\text{ms}$ ）依然具有较强的相关度



2020
北京

➤ 误差函数

$$\epsilon(k, T) = \sum_{d=k-T/2}^{k+T/2} \|(\mathbf{W}_l + \mathbf{W}_n[k])^H \mathbf{X}[d] - \mathbf{Y}[d]\|^2$$

短时累计误差函数



➤ 优化准则

$$\min_{\mathbf{W}_l} \min_{\mathbf{W}_n[d]} E\{\epsilon(k, T)\} = \min_{\mathbf{W}_l} \min_{\mathbf{W}_n[d]} E \left\{ \sum_{d=k-T/2}^{k+T/2} \|(\mathbf{W}_l + \mathbf{W}_n[k])^H \mathbf{X}[d] - \mathbf{Y}[d]\|^2 \right\}$$

最小平均短时累计误差准则

4. 双耦合滤波器设计(2)——求解 W_l



2020
北京

- **假设** $W_n^*[k]$ 是 $W_n[k]$ 的最优解, 优化问题可以简化为

$$\min_{W_l} E \left\{ \sum_{d=k-T/2}^{k+T/2} \|(W_l + W_n^*[k])^H X[d] - Y[d]\|^2 \right\}$$

- **满足** $E\{W_n^*[k]\} = 0$, $E\{W_n^*[k]^H X[d]\} = 0$
- **得到** W_l 的理论最优解 (Wiener-Hopf) 为 $W_l^* = R_X^{-1} P$
- **采用** NLMS 算法求解 $W_l[k+1] = W_l[k] + \frac{\mu}{X[k]^H X[k]} e[k] X[k]$

5. 双耦合滤波器设计(2)——求解 $W_n[k]$



2020
北京

- **假设** W_l^* 是 W_l 的最优解, 优化问题可简化为

$$\min_{W_n[k]} \sum_{d=k-T/2}^{k+T/2} \|(W_l^* + W_n[k])^H X[d] - Y[d]\|^2$$

$$\text{令 } g[d] = Y[d] - W_l^H X[d], \text{ 得 } \min_{W_n[k]} \sum_{d=k-T/2}^{k+T/2} \|W_n^H[k] X[d] - g[d]\|^2$$

- **得到** $W_n[k]$ 的最小二乘估计 $W_n^*[k] = (X^H X)^{-1} X^H G$

6. 双耦合滤波器设计(3)——构建耦合机制



2020
北京

定义线性度和非线性度因子

$$\rho_l[k] = \frac{\|\mathbf{w}_l^H \mathbf{X}[k]\|^2}{\|\mathbf{w}_l^H \mathbf{X}[k]\|^2 + \|\mathbf{w}_n^H[k] \mathbf{X}[k]\|^2}$$

$$\rho_n[k] = \frac{\|\mathbf{w}_n^H[k] \mathbf{X}[k]\|^2}{\|\mathbf{w}_l^H \mathbf{X}[k]\|^2 + \|\mathbf{w}_n^H[k] \mathbf{X}[k]\|^2}$$

根据比例调整学习步长

$$\mathbf{w}_l[k+1] = \mathbf{w}_l[k] + \frac{\mu \rho_l[k]}{\mathbf{X}^H \mathbf{X}} \mathbf{e}[k] \mathbf{X}$$

$$\mathbf{w}_n = (\mathbf{X}^H \mathbf{Q} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H \mathbf{Q} \mathbf{G}$$

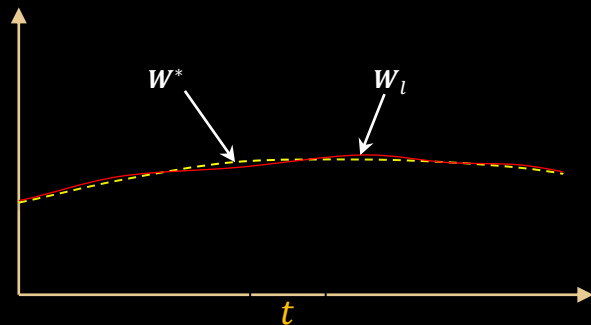
\mathbf{Q} 为对角矩阵, 对角元素为 ρ_n

7. 双耦合声学回声消除——定性分析

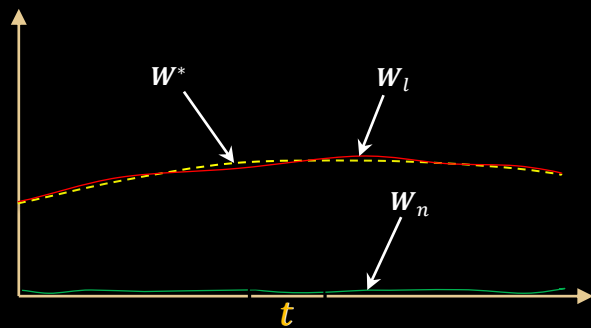


2020
北京

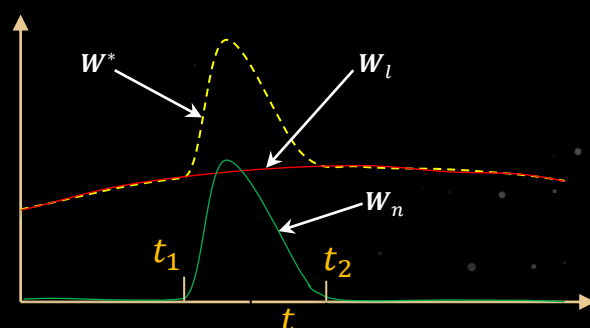
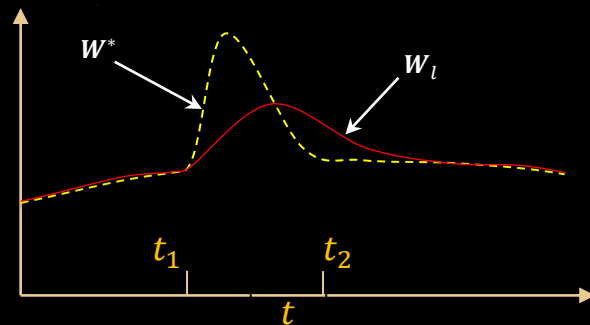
NLMS



双耦合



线性回声场景



非线性回声场景

8. 特性比较



2020
北京

	NLMS算法	双耦合算法
优化准则	最小均方误差准则	最小平均短时累计误差准则
理论最优解	Wiener-Hopf方程解	线性滤波器: Wiener-Hopf方程解 非线性滤波器: 最小二乘解
算法运算量	$O(M)$	$O(M) + O(N^2)$
控制机制	步长控制, 相对简单	双系统耦合控制, 相对复杂



2020
北京

PART 3

实验结果分析

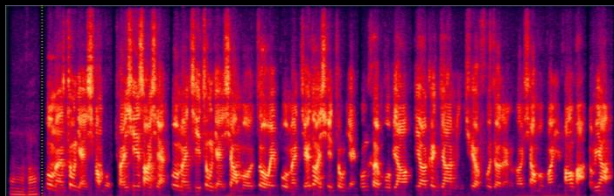
- 单讲测试场景
- 双讲测试场景

1. 单讲场景——强非线性失真情况

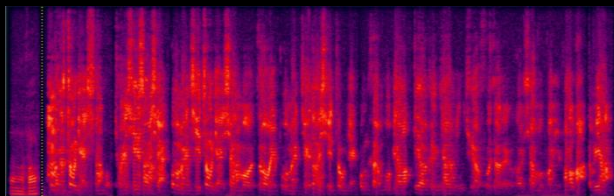


2020
北京

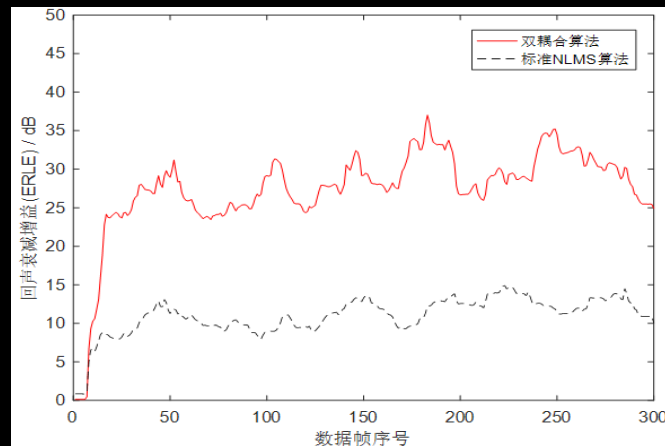
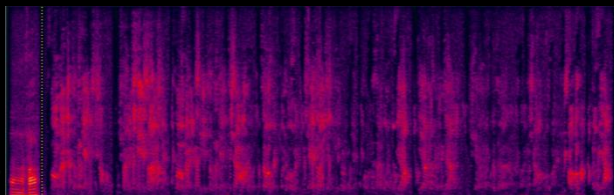
原信号



NLMS



双耦合



回声抑制比ERLE (值越大越好)

$$ERLE = 10 \log P_d / P_e$$

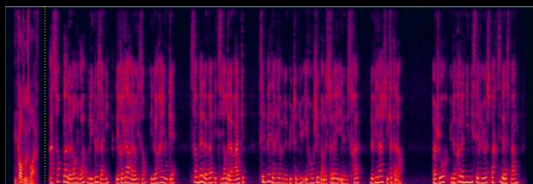
• P_d ——原回声功率 • P_e ——剩余回声功率

2. 单讲场景——弱非线性失真情况

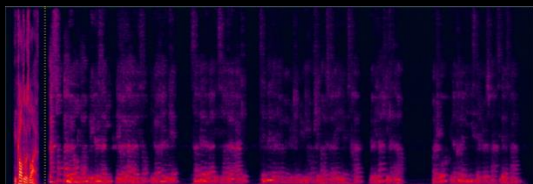


2020
北京

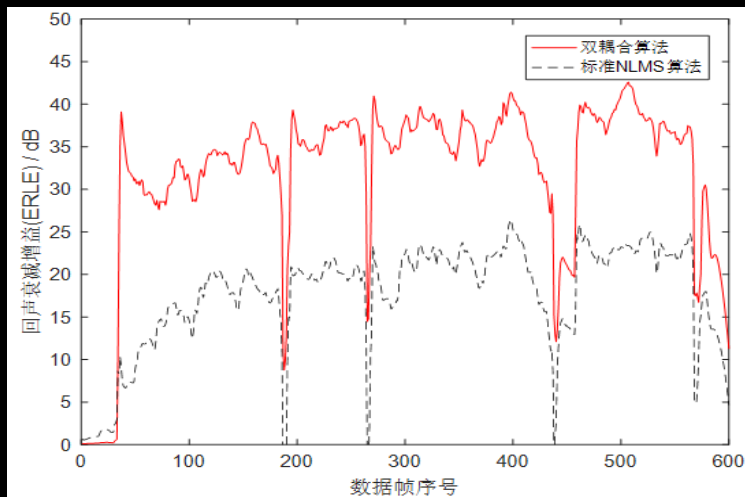
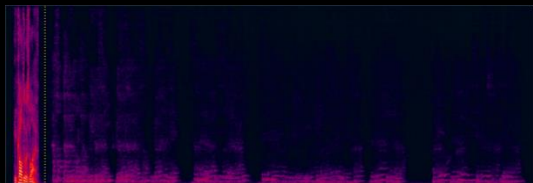
原信号



NLMS



双耦合



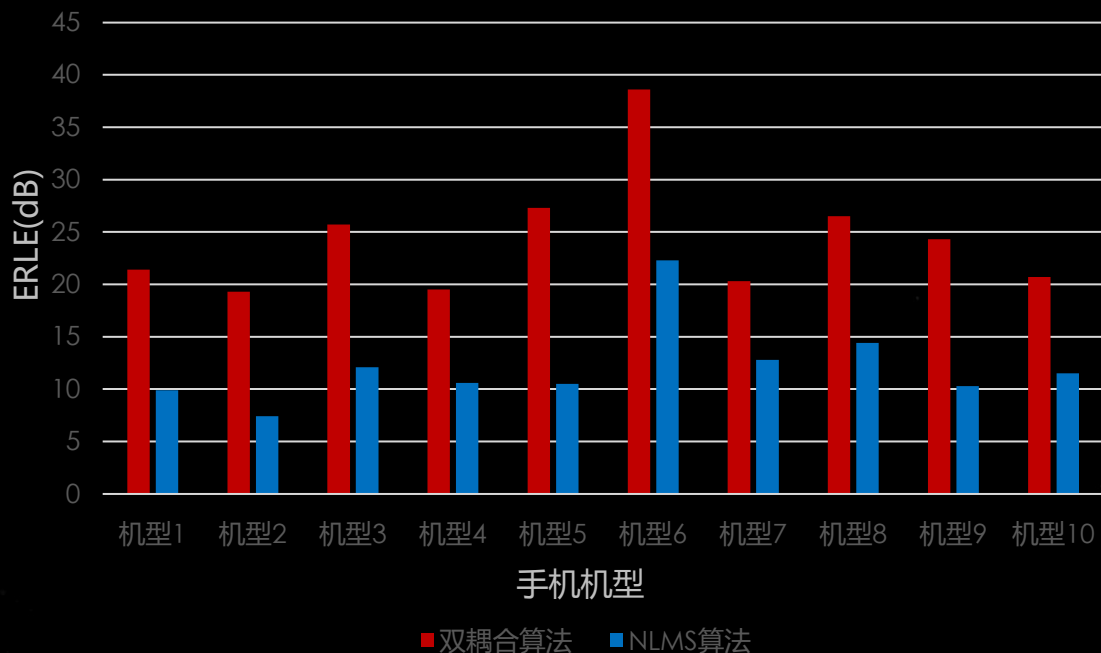
回声抑制比 (值越大越好)

3. 单讲场景——不同手机机型ERLE统计



2020
北京

不同手机机型ERLE比较



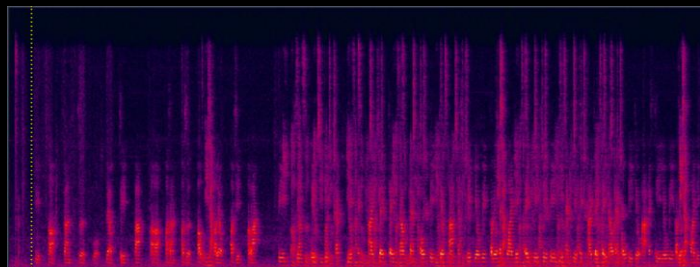
4. 双讲测试场景



2020
北京

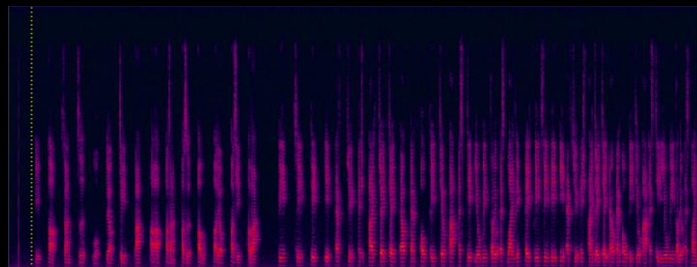
➤ 测试用例介绍

原信号



← 双讲段 →

回声参考信号

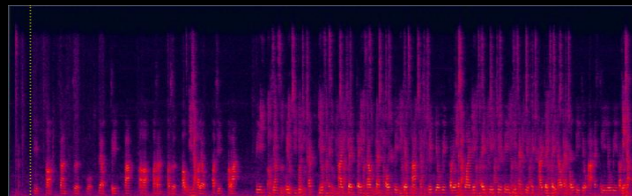


➤ 线性EC比较



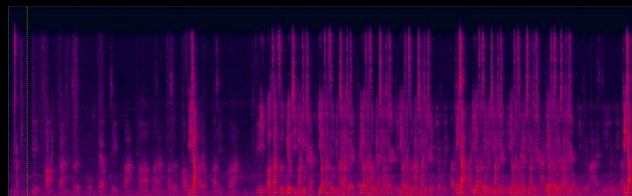
2020
北京

原信号

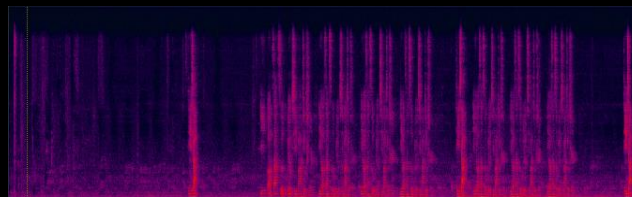


双讲段

NLMS



双耦合

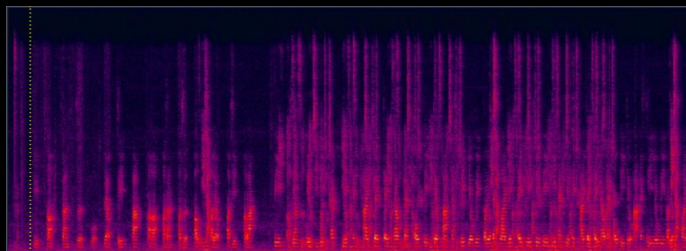


➤ NLP



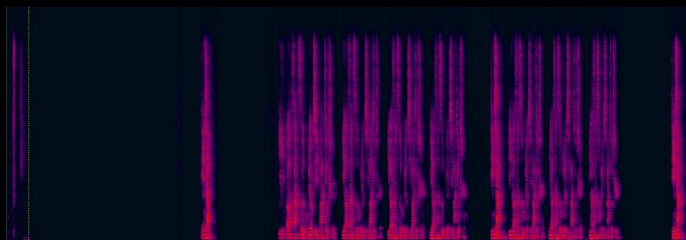
2020
北京

原信号



双讲段

NLP





2020
北京

PART 4

总结



2020
北京

1. 认识非线性声学回声

2. 双耦合声学回声消除算法

- 构建了双耦合自适应滤波器结构
- 提出了最小平均短时累计误差准则并进行求解
- 线性滤波器具有wiener-hopf方程解
- 非线性滤波器具有最小二乘解

3. 实验验证

- 双耦合算法在强非线性场景、线性场景和双讲场景下均取得了明显性能提升（相比于NLMS）
- ERLE提高10+dB
- 收敛速度更快（ $< 30\text{ms}$ ）
- 算法缺点：运算量偏大，耦合控制环节多，相对复杂



2020
北京

多媒体开启
MULTIMEDIA BRIDGE
TO A WORLD OF VISION

新视界

Thank you

