

◇ 研究报告 ◇

语声通信降噪研究

田玉静^{1†} 左红伟² 王超³

(1 青岛理工大学信息与控制工程学院 青岛 266033)

(2 青岛理工大学土木工程学院 青岛 266033)

(3 中兴通讯 GSM 网规网优部 西安 710065)

摘要: 语声通信系统中, 语声通过信道传输将不可避免地引入码间串扰和信号畸变, 同时受到噪声污染。该文在分析自适应常数模盲均衡算法和改进盲均衡算法的基础上, 考虑到自适应盲均衡技术在语声噪声控制方面能力有限, 将自适应盲均衡技术与小波包掩蔽阈值降噪算法联合使用, 形成一种基带语声增强新方法。仿真试验结果显示自适应盲均衡技术可以使星座图变得清晰而紧凑, 有效减小误码率。研究证实该方法在语声信号码间串扰和畸变严重情况下, 在白噪声及有色噪声的不同噪声环境中都具有稳定的降噪能力, 消噪同时可获得汉语普通话良好的听觉效果。

关键词: 盲均衡; 自适应算法; 通信系统; 语声增强

中图法分类号: TN713.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2020)06-0932-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.06.017

A research on voice communication de-noising

TIAN Yujing¹ ZUO Hongwei² WANG Chao³

(1 School of Information and Control Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

(2 School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

(3 ZTE Communications GSM Radio Network Planning & Optimization Department, Xi'an 710065, China)

Abstract: In the voice communication system, the voice signal is transmitted through the channel, which introduces the inter-symbol interference (ISI) and signal distortion. At the same time, it is polluted by noise. Based on the analysis of adaptive blind equalization algorithm CMA (constant modulus algorithm) and improved blind equalization algorithm, and considering the limited ability of adaptive blind equalization in speech noise control, in this paper, a new base-band voice enhancement method is developed by combining adaptive blind equalization with wavelet packet masking threshold noise reduction algorithm. The simulation shows that the adaptive blind equalization technology can make the constellation map clear and compact, and reduce the error rate effectively. The research verifies that the method has stable noise reduction ability in different noise environments, such as white noise and colored noise, under the condition of ISI of speech signal and serious distortion. At the same time, it can get good auditory effect in Mandarin Chinese.

Keywords: Blind equalization; Adaptive algorithm; Communication system; Voice enhancement

2020-03-23 收稿; 2020-06-28 定稿

作者简介: 田玉静 (1975-), 女, 山东潍坊人, 硕士, 高级实验师, 研究方向: 语声信号处理, 计算机系统仿真。

† 通信作者 E-mail: 2260006540@qq.com

0 引言

语音是人类通过发声器官发出^[1]、具有特定意义、用来进行信息交换的声音,是人类相互沟通最重要的工具。信息交换往往需要远距离传输,信号在传输过程中信道弥散造成码间串扰(Inter-symbol Interference, ISI),同时受到噪声污染。自适应均衡技术^[2]能消除ISI,进行噪声控制,有效提高信号质量,但在语音通信系统应用中要预先得到期望信号,对系统进行训练,这是不切实际的,所以不得不采用盲均衡^[3]。自适应盲均衡算法能在信道畸变相当严重的条件下不借助训练信号序列,仅根据信道输出信号序列统计特性来获得信道响应信息,补偿期望响应序列信息,通过自适应均衡算法消除ISI和噪声。自适应盲均衡技术研究在语音通信、数字通信、无线通信系统中具有深远意义。

自适应盲均衡算法能有效消除ISI补偿信号畸变,但其噪声控制效果不佳。小波包分析能利用听觉掩蔽特性,降低噪声,拟合听觉感知,恢复语音细节信息,有效提高语音通信保真度。本文将自适应盲均衡技术引入语音通信系统与小波包掩蔽阈值降噪算法联合使用,形成了一种语音通信基带噪声控制新方法。文中分析了两种自适应盲均衡算法。常数模(Constant modulus algorithm, CMA)盲均衡算法简单、收敛性好,得到了广泛应用,但其在干扰噪声严重的传输情况下均衡信号失真严重。改进算法降低了稳态误差,在最小化均方误差(Mean squared error, MSE)下,获得ISI与噪声抑制间的最佳平衡;在强干扰噪声下,有效提高误码率,减少信号失真,算法的有效性和稳健性都有所增强。仿真研究表明,在语音信号ISI和畸变严重情况下,该方法在白噪声及有色噪声的不同噪声环境中都具有稳定的降噪能力,消噪同时可获得汉语普通话良好的听觉效果。

1 自适应盲均衡算法

自适应盲均衡滤波器结构见图1虚线框部分。自适应盲均衡算法^[4]如下:设 a_n 为输入序列,信道系统函数为 $h(n)$,均衡器系数初始估计值为 $c(n)$,假定信道和均衡器脉冲响应的卷积分解为

$$h(n) * c(n) = \delta(n) + h_{\text{ISI}}(n), \quad (1)$$

其中, $h_{\text{ISI}}(n)$ 是产生ISI的分量,均衡器输出为

$$\begin{aligned} \hat{y}(n) &= c(n) * x(n) \\ &= c(n) * [h(n) * a_n + v(n)] \\ &= a_n + h_{\text{ISI}}(n) * a_n + c(n) * v(n) \\ &\triangleq a_n + \hat{v}(n), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $h_{\text{ISI}}(n) * a_n$ 是ISI残留; $c(n) * v(n)$ 为附加噪声,通过运用中心限定定理,卷积噪声 $\hat{v}(n)$ 可用高斯白噪声模拟,且 a_n 与 $\hat{v}(n)$ 是统计独立的,则 a_n 的最小MSE估计 $z(n)$ 为

$$z(n) = E\{a_n|\hat{y}(n)\} \triangleq \tilde{\varphi}[\hat{y}(n)]. \quad (3)$$

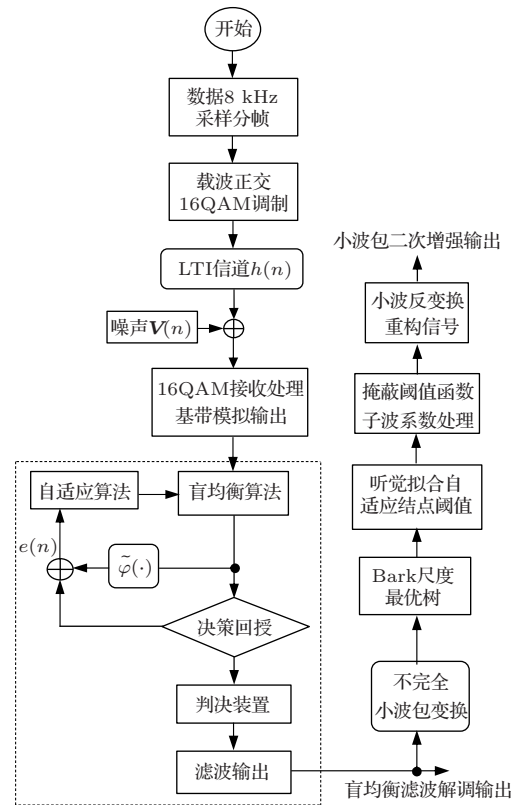


图1 语音通信系统降噪新方法

Fig. 1 A new method of noise reduction in speech communication system

由于 a_n 是非高斯分布, $\hat{y}(n)$ 为非线性函数,则先验误差为

$$e(n) = \tilde{\varphi}[\hat{y}(n)] - \hat{y}(n), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}(n) &= \sum_{k=-L}^L c_k^*(n-1)x(n-k) \\ &\triangleq c^H(n-1)x(n), \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)为均衡输出。由此导出盲均衡的先验随机梯度算法:

$$c(n) = c(n-1) + \mu x(n)e^*(n), \quad (6)$$

其中, μ 为自适应步长。根据 MSE 原则或强制零原则, 算法性能取决于 $c(n)$ 接近最佳值 c_0 的程度。如果 $c(0)$ 近似于 c_0 , ISI 就会大大减少, 即眼图是张开的, 判决设备会以低错误率得出正确判别, 算法会收敛于 c_0 ; 相反若 $c(0)$ 离 c_0 较远, 码眼闭合, 误差曲面是多模的。式(4)~式(6)就是最小均方(Least mean square, LMS)型盲均衡算法。下面从成本函数重新推导式(6), 得到

$$p(n) \triangleq E\{\tilde{\varphi}[\hat{y}(n)]\}, \quad (7)$$

其中:

$$\varphi(y) \triangleq \tilde{\varphi}(y) - y. \quad (8)$$

求非线性函数 φ 的导数:

$$\varphi(y) \triangleq \varphi'(y) = \frac{\partial \varphi(y)}{\partial y}, \quad (9)$$

φ 的非线性导致成本函数对于 $\hat{y}(n)$ 和 a_n 的高阶统计量依赖性。式(7)不需要输入序列 a_n , 反映当前 ISI 的大小, 为均衡参数的二次非凸函数, 其最小值对应 ISI 或 MSE 的最小值。非线性函数 $\tilde{\varphi}$ 的不同选择就会产生各种盲均衡算法。

正交振幅调制(Quadrature amplitude modulation, QAM)信号星座图算法(Godard 算法)^[5]

$$\varphi_p[\hat{y}(n)] = \frac{1}{2p} [R_p - |\hat{y}(n)|^p]^p, \quad (10)$$

其中, p 为正整数; R_p 为正实常数,

$$R_p \triangleq \frac{E\{|a_n|^{2p}\}}{E\{|a_n|^p\}}, \quad (11)$$

其中, R_p 即为 p 阶散射。 $p=2$ 时, Godard 算法即转变为 CMA 算法^[6], 成本函数为

$$p(n) = E\{[R_2 - |\hat{y}(n)|^2]^2\}, \quad (12)$$

式(12)取最小值时的系数值接近 MSE 最小值。

$$\hat{y}(n) = \sum_{k=-L}^L c_k^*(n-1)x(n-k), \quad (13)$$

$$e(n) = \hat{y}(n)[R_2 - |\hat{y}(n)|^2], \quad (14)$$

$$c(n) = c(n-1) + \mu x(n)e^*(n), \quad (15)$$

$$R_2 \triangleq \frac{E\{|a(n)|^4\}}{E\{|a(n)|^2\}}. \quad (16)$$

CMA 自适应算法简单, 能独立于载波恢复系统与其同时运行, 其性能依靠输入信号的二阶统计量平稳度。当存在信道噪声 $v(n)$ 时, 理想均衡不可能实现, 通过研究高阶统计量, 致力于寻求在最小

化 MSE 下, 获得 ISI 与噪声抑制间的最佳平衡。改进的盲均衡自适应算法^[7]如下:

信道的连续时间输出 $\tilde{x}(t)$ 为

$$\tilde{x}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \tilde{h}_r(t - kT_B - t_0) + \hat{v}(n), \quad (17)$$

其中, T_B 为字符时长, 当 $t = nT_B/2$ 时, 其离散信号 $x(n)$ 为

$$x(n) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k h_r(n-2k) + v(n), \quad (18)$$

其中, $h_r(n)$ 为等价离散冲击响应, $v(n)$ 为等价高斯白噪声, 定义 $(M+L-1) \times M$ 阶信道均衡输出为

$$\hat{y}(n) = \sum_{k=0}^{2M-1} C_k x(2n+1-k), \quad (19)$$

$$\hat{y}(n) = \sum_{k=0}^{M-1} C_k^e x^0(n-k) + \sum_{k=0}^{M-1} C_k^0 x^e(n-k), \quad (20)$$

其中, $c_k^e = c_{2k}$, $c_k^0 = c_{2k+1}$, $x^e(n) = x(2n)$, $x^0(n) = x(2n+1)$ 。

从发送字符 a_n , 到输出 $\hat{y}(n)$ 的复合脉冲响应 $\tilde{h}(n)$ 的时域表达式为

$$\tilde{h}(n) = c_n^e * h^0(n) + c_n^0 * h^e(n). \quad (21)$$

定义信道矩阵为 \mathbf{H}_e , 子均衡矢量 $\tilde{\mathbf{C}}_e \triangleq [C_0^e C_1^e \cdots C_{M-1}^e]^\text{T}$, 相应的矩阵为 \mathbf{H}_0 和 \mathbf{C}_0 ; 利用矩阵形式表达式(21)的卷积, 有 $\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{H}_e \mathbf{C}_e$, 其中 $\mathbf{H} \triangleq [\mathbf{H}_e \mathbf{H}_0]$, $\mathbf{C} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{C}_e \\ \mathbf{C}_0 \end{bmatrix}$ 。若无噪声 $v(n)$ 且满足 $\delta_{n_0} = \mathbf{H}\mathbf{C} \triangleq [0 \cdots 0 1 0 \cdots 0]^\text{T}$, 系统就会免于 ISI, 实现理想均衡。当信道噪声 $v(n)$ 存在, 延迟 n_0 满足 $0 \leq n_0 \leq M+L-1$, 最小化数据字符误差率见式(22):

$$e(n) \triangleq \hat{y}(n) - a_{n-n_0}. \quad (22)$$

定义 $\mathbf{a}_n \triangleq [a_n a_{n-1} \cdots a_{n-(M+L-1)}]^\text{T}$, $\mathbf{V}(n) = [v(n-1) \cdots v(n-2L+2)]^\text{T}$ 均衡输出可得

$$\hat{\mathbf{y}}(n) = \mathbf{a}_n^\text{T} \mathbf{H}\mathbf{C} + \mathbf{V}^\text{T}(n)\mathbf{C}, \quad (23)$$

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{a}_n^\text{T} (\mathbf{H}\mathbf{C} - \delta_{n_0}) + \mathbf{V}^\text{T}(n)\mathbf{C}. \quad (24)$$

差错率 $e(n)$ 的均方值为

$$\begin{aligned} E\{|e(n)|^2\} &= \delta_a^2 (\mathbf{H}_c - \delta_{n_0})^\text{H} (\mathbf{H}_c - \delta_{n_0}) + \delta_v^2 \mathbf{C}^\text{H}\mathbf{C} \\ &= \text{MSE}(c, n_0). \end{aligned} \quad (25)$$

用线性 MSE 估计, 推导出相对于 $\hat{\mathbf{C}}$ 的最小化 MSE:

$$\begin{aligned} & \min \text{MSE}(c, n_0) \\ & = \delta_{n_0}^T \left[\mathbf{I} - \mathbf{H} \left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{\delta_v^2}{\delta_a^2} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H \right] \delta_{n_0}, \quad (26) \end{aligned}$$

通过对式(26)矩阵对角元素求最小值, 可得到最佳值。

自适应盲均衡算法能有效去除语声传输系统的ISI, 但输出信号对语声细节信息处理欠佳, 残留噪声比较严重。为了获得更好的语声通信效果, 实验对盲均衡滤波输出的基带语声信号做二次增强处理, 进一步消除均衡滤波增强语声信号中的残余噪声。

2 结合听觉感知的小波包降噪算法

小波分析算法简单, 其能利用人耳听觉掩蔽特性拟合声道发声^[8], 选其作为语声增强二级处理算法, 详细算法见参考文献[9–10]。简述算法如下: 将含噪信号小波包五级分解, 得到二尺度方程, 推广二尺度方程, 得到前后两个尺度之间的子波系数关系, 见式(27):

$$\begin{cases} d_m^{j+1, 2n} = \sum_l d_l^{j, h} h_{l-2m}^{\wedge}, \\ d_m^{j+1, 2n+1} = \sum_l d_l^{j, n} g_{l-2m}^{\wedge}. \end{cases} \quad (27)$$

含噪语声经小波包分解化为

$$y_j^n(t) = \sum_l d_l^{j, n} 2^{-j/2} u_n(2^{-j}t - l). \quad (28)$$

根据人耳听觉感知特性^[11], 对结点划分不同Bark子带, 将临界带中每层小波变换后的系数由小到大排列, 构成向量 \mathbf{P} , 求各子带风险序列, 找到风险最小值:

$$\begin{aligned} \gamma(k) &= \frac{1}{N} \left[N - 2k + \sum_{i=1}^k p_i + (N - k)p(N - k) \right], \\ 1 &< k < m, \quad 1 \leq i \leq N. \end{aligned} \quad (29)$$

计算风险向量 $\mathbf{R} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N]$, 以 \mathbf{R} 元素中最小作为风险值求出对应的 \mathbf{P}_i 。

估计子代噪声的方差 δ_n^2 :

$$\delta_n^2 = \frac{1}{[(N/2) - 1]} \sum_{i=1}^{N/2} (d_i - \tilde{d})^2, \quad (30)$$

其中, d_i 为子代分解细节信号, $\tilde{d} = \text{mean}(d_i)$ 。

计算每个小波包树终端结点 k 处的噪声标准差 σ_{nk}^2 :

$$\sigma_{nk}^2 = \frac{[\text{MAD}]_{k,j}}{0.6745} \text{In}(j + 1), \quad (31)$$

其中, $[\text{MAD}]_{k,j}$ 是小波包树终端结点 k 处在尺度 j 上小波系数中值绝对值。

计算阈值 T :

$$T = \lambda \sqrt{p(\gamma_{\min})}, \quad \lambda = (\sigma_n^2 / \sigma_{nk}^2), \quad (32)$$

其中, γ_{\min} 为 γ_i 的最小值。

通过子代噪声方差估计, 设置参数 λ , 实时跟踪各尺度噪声水平, 自适应调整阈值 T , 重构各尺度的剩余系数, 经小波反变换重建信号, 尽可能在抑制残留噪声的同时, 保留语声高频信号和弱特征分量, 减小语声失真。

3 语声通信系统消噪新方法仿真研究

语声通信的信息处理速度日益提高, 码速率越高, ISI问题越严重, 加之信道干扰的突变随机性, 常规增强算法已无力处理复杂干扰。本文引入了自适应盲均衡技术来消除ISI和信号畸变, 考虑到自适应盲均衡技术在噪声控制方面能力有限, 将自适应盲均衡技术与小波包掩蔽阈值降噪算法联合使用, 形成一种语声通信系统基带消噪新方法, 该方法的完整系统模型见图1。传输函数模拟信道, 混入加性噪声 $v(n)$, 混噪信号通过自适应盲均衡滤波, 去除ISI和畸变, 过滤部分噪声, 再用小波包听觉掩蔽阈值做二次增强。纯净语声信号选用16QAM调制^[12](16QAM每符号4 bit信息, 相同码元速率下, QAM的传输效率高, 在通信新技术中广泛应用)。通过提取信号二阶及高阶统计量多算法融合, 接收端信号盲处理, 实验验证算法可对语声通信系统噪声有效稳健去除。

3.1 自适应盲均衡算法性能测试

首先测试盲均衡算法的抗干扰能力。用16QAM调制模块建立仿真, 仿真16QAM数据传输系统, 模拟图1中的自适应盲均衡系统, 信道系统函数为 $H(Z) = 0.2 + 0.5Z^{-1} + Z^{-2} - 0.1Z^{-3}$, 信道背景噪声为高斯白噪声, 输入信噪比设定 $\text{SNR} = 0$ dB, 均衡器 $M = 8$ 。

自适应盲均衡算法收敛后星座图对比见图2。图2(a)为盲均衡器输入端接收到的信道噪声附加信号的星座图, 很明显ISI和噪声的复合影响使得

信号质量恶劣,几乎无法检测;图2(b)为CMA自适应算法下盲均衡输出端的信号星座图;图2(c)为改进自适应算法下盲均衡输出端的信号星座图,对比可见采用改进自适应盲均衡算法有很强的去除ISI能力。

自适应盲均衡技术对信道噪声和大量ISI都能有效抑制,算法收敛稳定,对采样相位不敏感,在严重噪声干扰的情况下自适应均衡性能良好。CMA

算法迭代5000至12000次左右收敛,改进算法迭代8000至20000次左右收敛,收敛速度取决于输入信号的平稳性。CMA算法均衡速度快,实现复杂度低,改进算法复杂度稍高。仿真结果显示,采用自适应盲均衡技术可以降低均方误差,使得星座图变得清晰而紧凑,有效消除ISI,提高通信系统性能。由星座图呈现效果可见改进算法对ISI的抑制能力更强,工程实际应用时可按需选择。

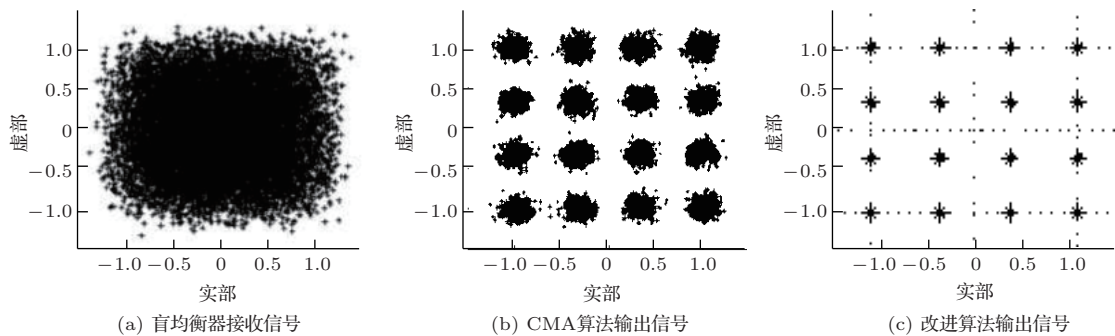


图2 自适应盲均衡算法收敛后星座图对比

Fig. 2 Comparison of constellations after convergence of adaptive blind equalization algorithm

3.2 新系统语音增强仿真实验

利用如图1所示的语音消噪方法,进行基带语音通信系统语音消噪仿真研究。噪声数据取自The Signal Processing Information Base (SPIB)数据库,选取白噪声(White Noise)、餐厅内嘈杂噪声(Speech Babble)、粉红噪声(Pink Noise)、工厂车间噪声(Factory Floor Noise)、高频信道噪声(HF Channel Noise)。实验语音来自LibriSpeech学术语音数据库,播音员男声标准普通话朗读宋词“赤壁怀古”语料,仿真实验语音时长1.6 s。信号的采样率为8 kHz,帧长 $L = 256$ (32 ms)。自适应盲均衡输入端信噪比为0 dB、5 dB、10 dB、20 dB。

图3为信道输出混高斯白噪声、自适应盲均衡滤波输入端信噪比均为0 dB条件下,算法噪声消除性能语音波形对比图。图3(a)是纯净语音信号波形图;图3(b)为混高斯白噪声,混噪波形;图3(c)为白噪声下CMA盲均衡算法自适应滤波输出波形;图3(d)为白噪声下改进盲均衡算法自适应滤波输出波形;图3(e)是白噪声下小波包二次增强输出。

图4为同一语音信号混合噪声换成餐厅内嘈杂噪声时,算法噪声消除性能语音波形对比图。图4(a)是纯净语音信号波形图;图4(b)为混Speech Babble噪声,混噪波形;图4(c)为Speech Babble噪声

下,CMA盲均衡算法自适应滤波输出波形;图4(d)为Speech Babble噪声下改进盲均衡算法自适应滤波输出波形;图4(e)是Speech Babble噪声下小波包二次增强输出。

由波形图可以直观看出CMA盲均衡算法在高斯白噪声下性能尚可,但其在非高斯噪声下,语音波形失真严重。改进盲均衡算法在高斯白噪声及非高斯噪声下,算法的有效性和稳健性都有所增强。小波包二次增强能有效恢复语音细节信息。

对仿真实验结果进行量化客观性能^[13]评价:

(1) 分段信噪比(SNR_{seg})^[14]:计算语音信号每一帧信噪比,取其平均值, SNR_{seg} 越大,则消噪效果越好。定义形式为

$$\text{SNR}_{\text{seg}} = \frac{10}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \lg \frac{\sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n)]^2}{\sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n) - \hat{f}(m, n)]^2}, \quad (33)$$

其中, $f(m, n)$ 为纯净语音信号幅值, $\hat{f}(m, n)$ 为消噪后的信号幅值, m 为帧号, N 为帧长, $m = 1, 2, \dots, N, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1, M$ 为总帧数。算法增强后的语音 SNR_{seg} 结果比较见表1。

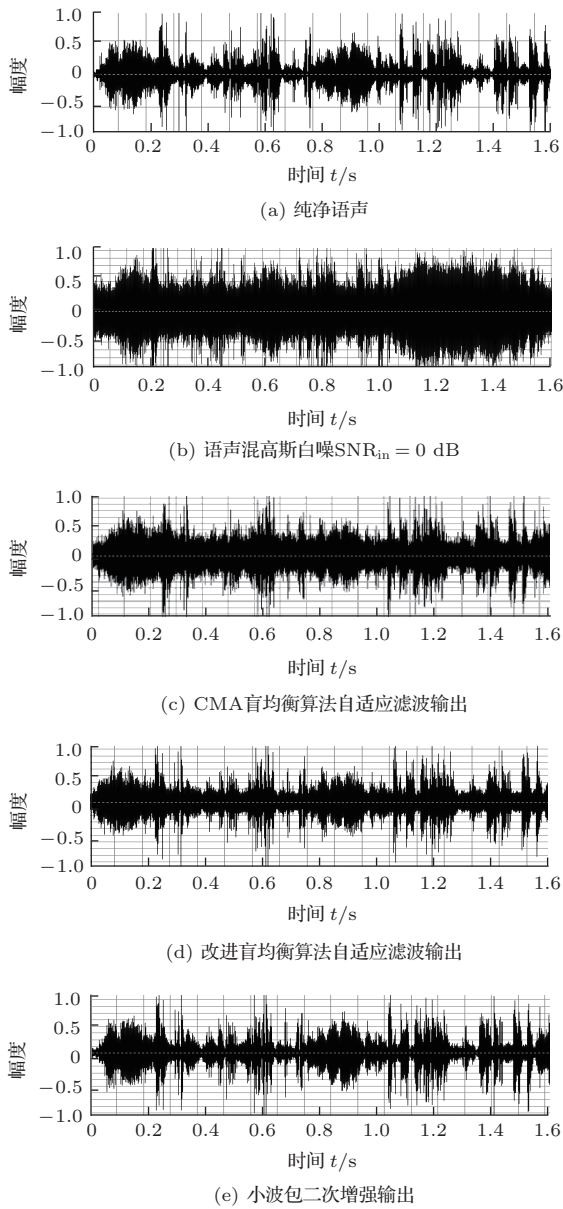


图3 混白噪声输入信噪比为0 dB时算法噪声消除语音波形对比

Fig. 3 Comparison of speech waveforms when the input SNR of mixed White Noise is 0 dB

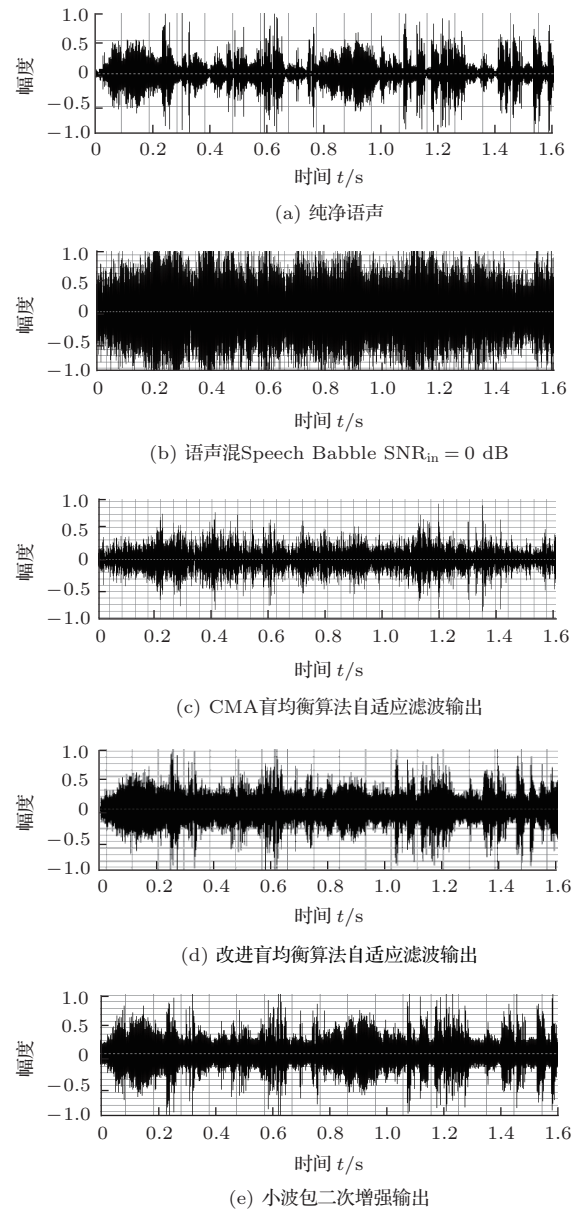


图4 混Speech Babble噪声输入信噪比为0 dB时算法噪声消除语音波形对比

Fig. 4 Comparison of speech waveforms when the input SNR of mixed Speech Babble noise is 0 dB

(2) 语音质量感知评估 (Perceptual evaluation of speech quality, PESQ)^[15]: 采用ITU-TP.862标准, 可评价降噪输出语音的听觉效果。该分值为4.5 ~ -0.5之间, 得分越高则输出语声音质越好。算法增强后的语音PESQ得分结果比较见表2。

通过分段信噪比数值和算法增强后的语音PESQ分值, 可以看出CMA盲均衡算法滤波输出残留噪声严重, 听觉效果差; 改进的盲均衡算法自适应滤波输出信噪比有所提高, 但在人耳听觉效果方

面仍有待提高; 通过小波包二次增强, 信噪比有效提升, 语音听觉清晰度和可懂度进一步改善, 获得良好的听觉效果。将自适应盲均衡技术引入语音通信系统与小波包掩蔽阈值算法结合进行噪声控制, 研究表明该方法在语音信号ISI和畸变严重情况下, 在白噪声及有色噪声的不同噪声环境中都具有稳定的降噪能力, 消噪同时可获得汉语普通话良好的听觉效果。

表1 不同算法SNRseg比较

Table 1 SNRseg comparison of different algorithms

(单位: dB)				
噪声类型	输入 SNR	CMA 算法	改进算法	二次增强
白噪声	0	1.32	2.76	5.13
	5	7.33	8.57	10.32
	10	13.41	14.52	16.05
	20	23.98	25.69	28.52
Speech Babble	0	0.76	2.58	4.21
	5	6.74	7.85	9.45
	10	12.21	13.69	15.83
	20	23.17	24.78	26.89
Pink Noise	0	0.69	2.63	4.34
	5	6.75	8.32	9.97
	10	12.54	14.48	15.69
	20	23.52	25.43	27.02
Factory Floor Noise	0	0.78	2.47	4.45
	5	6.24	8.22	10.01
	10	12.51	13.89	15.26
	20	22.43	24.78	26.78
HF Channel Noise	0	0.54	2.23	4.52
	5	5.98	6.41	8.76
	10	11.65	12.54	14.89
	20	22.12	24.23	26.78

表2 不同算法PESQ比较

Table 2 PESQ comparison of different algorithms

噪声类型	输入 SNR	CMA 算法	改进算法	二次增强
白噪声	0	0.71	1.72	2.88
	5	1.07	2.23	2.96
	10	1.42	2.54	3.29
	20	1.98	2.87	3.86
Speech Babble	0	0.45	1.56	2.53
	5	0.94	2.15	2.68
	10	1.32	2.47	3.12
	20	1.87	2.63	3.67
Pink Noise	0	0.54	1.63	2.61
	5	0.90	2.19	2.92
	10	1.25	2.31	3.14
	20	1.69	2.52	3.72
Factory Floor Noise	0	0.62	1.58	2.41
	5	0.92	2.26	2.67
	10	1.16	2.45	3.20
	20	1.54	2.53	3.58
HF Channel Noise	0	0.41	1.65	2.36
	5	0.75	2.14	2.65
	10	1.01	2.37	2.98
	20	1.49	2.50	3.35

4 结论

通信系统中信号通过传输, ISI和信号畸变严重, 自适应盲均衡技术能有效去除ISI, 提高通信系统性能。本文分析了两种自适应盲均衡算法: CMA盲均衡算法和改进盲均衡算法, 在语声通信系统中引入自适应盲均衡技术能有效对语声信道失真进行补偿, 减小ISI, 由于自适应盲均衡技术在语声噪声控制方面能力有限, 本文将自适应盲均衡技术与小波包掩蔽阈值降噪算法联合使用, 形成一种基带语声增强新方法。采用小波包掩蔽阈值听觉拟合二次增强, 恢复语声细节信息, 有效提高语声通信保真度。仿真研究证实该方法在语声通信ISI和信号畸变严重情况下, 在白噪声和有色噪声的不同噪声环境中都具有稳定的消噪能力。其在语声通信、无线通信、数据通信等领域具有实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 连海伦, 周健, 胡雨婷, 等. 利用深度卷积神经网络将耳语转换为正常语音[J]. 声学学报, 2020, 45(1): 137-144.
Lian Hailun, Zhou Jian, Hu Yuting, et al. Using deep convolutional neural network to convert whispers into normal speech[J]. Acta Acustica, 2020, 45(1): 137-144.
- [2] 马思扬, 彭华, 王彬. 适用于稀疏多径信道的稀疏自适应常模盲均衡算法[J]. 通信学报, 2017, 38(1): 149-157.
Ma Siyang, Peng Hua, Wang Bin. Sparse adaptive normal mode blind equalization algorithm for sparse multipath channels[J]. Journal on Communications, 2017, 38(1): 149-157.
- [3] 曾乐雅, 许华, 王天睿. 自适应切换双模盲均衡算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(11): 2780-2786.
Zeng Leya, Xu Hua, Wang Tianrui. Adaptive switching dual-mode blind equalization algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(11): 2780-2786.
- [4] Preaches J G. Digital communications[M]. Fourth Edition. New York: McGraw-Hill, 2006, 6: 660-708.

- [5] Ackenhusen J G. Real-time signal processing: design and implementation of signal processing systems[M]. New York: Prentice Hall PTR, 2006, 6: 362–488.
- [6] 毕英杰, 李森. 基于最大相关熵准则的恒模盲均衡算法[J]. 信号处理, 2020, 36(1): 118–124.
Bi Yingjie, Li Sen. Constant modulus blind equalization algorithm based on maximum correlation entropy criterion[J]. Signal Processing, 2020, 36(1): 118–124.
- [7] Manolakis D G, Ingle V K, Kogon S M. Statistical and adaptive signal processing[M]. New York: McGraw-Hill, 2013, 5: 656–706.
- [8] 韩纪庆, 张磊, 郑铁然. 语音信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 12–94.
- [9] 田玉静, 左红伟, 董玉民, 等. 小波包自适应阈值语音降噪新算法[J]. 应用声学, 2011, 30(1): 72–80.
Tian Yujing, Zuo Hongwei, Dong Yumin, et al. A new algorithm for wavelet packet adaptive threshold speech noise reduction[J]. Applied Acoustics, 2011, 30(1): 72–80.
- [10] 田玉静, 左红伟, 董玉民, 等. Bark子带小波包自适应阈值语音去噪方法[J]. 计算机应用, 2010, 30(11): 3111–3114.
Tian Yujing, Zuo Hongwei, Dong Yumin, et al. Bark subband wavelet packet adaptive threshold speech denoising method[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(11): 3111–3114.
- [11] 蔡军, 李飞, 张毅. 基于听觉掩蔽效应的语音增强算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(7): 288–292, 297.
Cai Jun, Li Fei, Zhang Yi. Speech enhancement algorithm based on auditory masking effect[J]. Computer Engineering, 2017, 43(7): 288–292, 297.
- [12] 黄思嘉, 杜庆治, 龙华, 等. 幅度与相位分步识别的QAM调制模式识别算法[J]. 通信技术, 2020, 53(2): 261–267.
Huang Sijia, Du Qingzhi, Long Hua, et al. QAM modulation pattern recognition algorithm based on amplitude and phase stepwise recognition[J]. Communication Technology, 2020, 53(2): 261–267.
- [13] 袁文浩, 梁春燕, 夏斌, 等. 一种融合相位估计的深度卷积神经网络语音增强方法[J]. 电子学报, 2018, 46(10): 2359–2366.
Yuan Wenhao, Liang Chunyan, Xia Bin, et al. A deep convolutional neural network speech enhancement method fused with phase estimation[J]. Chinese Journal of Electronics, 2018, 46(10): 2359–2366.
- [14] 李真, 吴文锦, 张勤, 等. 基于最大后验相位估计的多带谱减语音增强算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(9): 2282–2286.
Li Zhen, Wu Wenjin, Zhang Qin, et al. Multi-band spectral subtraction speech enhancement algorithm based on maximum a posteriori phase estimation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(9): 2282–2286.
- [15] 王文益, 伊雪. 基于改进语音存在概率的自适应噪声跟踪算法[J]. 信号处理, 2020, 36(1): 32–41.
Wang Wenyi, Yi Xue. Adaptive noise tracking algorithm based on improved speech existence probability[J]. Signal Processing, 2020, 36(1): 32–41.