

一种基于几何谱减法和听觉掩蔽效应的语音增强方法

万义龙, 张天骐, 王志朝, 金 静

(重庆邮电大学 信号与信息处理重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 针对低信噪比下非平稳噪声环境情况, 几何谱减算法产生较大的语音畸变的缺点, 提出了一种结合听觉掩蔽效应的改进算法, 该算法通过对噪声的实时估计, 同时结合听觉掩蔽效应设计一个感知滤波器, 对增强后的信号频谱进行滤波以抑制背景噪声, 从而将残留噪声强度控制在掩蔽阈值之下. 通过计算 PESQ、oSNR、语谱图及时域仿真波形图分析及主观试听表明: 改进的几何谱减算法不仅提高了语音信号的信噪比, 而且残留噪声和语音畸变较小, 提高了语音的可懂度.

关键词: 语音增强; 几何谱减法; 听觉掩蔽效应; 感知滤波器

中图分类号: TN912.35

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)02-0080-05

Speech Enhancement Based on Spectral Subtraction of Geometric Approach and Auditory Masking Effect

WAN Yi-long, ZHANG Tian-qi, WANG Zhi-chao, JIN Jing

(Chongqing Key Laboratory of Signal and Information Processing (CQKLS&IP),
Chongqing University of Posts and Telecommunications (CQUPT), Chongqing 400065, China)

Abstract: Aiming at non-stationary noise under low signal-to-noise ratio environment situation, the geometric approach to spectral subtraction algorithm produces a larger voice distortion shortcomings, An improved algorithm is proposed based on auditory masking effect, thus to control the residual noise strength under the masking threshold. By calculating the PESQ, oSNR, Spectrogram and time domain simulation waveform diagram analysis and subjective listening test show that improved geometric spectral subtraction algorithm not only improves the signal-to-noise ratio of speech signals, but also reduces the residual noise and speech distortion, to improve the speech intelligibility.

Key words: speech enhancement; spectral subtraction of geometric approach; auditory masking effect; perceptual filter

1 引言

现实环境中, 语音信号不可避免地受到周围各种环境噪声的影响, 如何去除噪声一直都是作为语音信号处理重要的课题. 语音增强作为提高语音质量和消除噪声的一种通用有效手段, 已经广泛应用于移动电话、声控系统、多场所远程会议和自动语音

识别系统(Automatic Speech Recognition, ASR)等领域.

语音增强中谱减法具有原理简单易于实现和运算量小等优点, 一直被广泛应用于语音增强中. 但传统谱减算法假设条件不合理, 与大多数语音增强算法一样, 在对带噪语音进行消除和抑制的同时, 往往会导致语音畸变, 损害了语音的可懂性^[1]. 为克服传统

收稿日期: 2013-03-29; **修回日期:** 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(61071196, 61102131); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0927); 信号与信息处理重庆市市级重点实验室建设项目(CSTC2009CA2003); 重庆市杰出青年基金项目(CSTC2011jjq40002); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2010BB2398, CSTC2010BB2409, CSTC2010BB2411, CSTC2012JJA40008); 重庆市教育委员会科研项目(KJ120525)

谱减法的这些缺点,其改进的算法如基于多频带谱减法^[2]、基于多窗谱改进的谱减法^[3]、基于听觉掩蔽效应改进谱减法^[4-5]等,这些改进算法在减少语音失真方面及消除音乐噪声均有一定效果但并不理想.针对传统谱减法中交叉项被忽略的假设及低信噪比环境中会产生音乐噪声等缺点,Yang Lu 等人^[6]提出利用带噪语音的短时相位关系推导出三个向量的几何关系得出先验信噪比估计的语音增强算法,即几何谱减法.此方法考虑到交叉项对语音增强的效果影响,从而在去除“音乐噪声”提高信噪比等方面有较好的性能,但增强后的语音信号语音畸变较大.

针对几何谱减法的不足,本文提出了一种结合人耳听觉掩蔽效应的几何谱减算法,用基于 Johnston 听觉掩蔽模型的感知滤波器对增强后的信号频谱进行滤波以抑制背景噪声,能够将语音畸变的程度控制在可感知的范围之外.

2 几何谱减算法

2.1 增益函数

传统谱减法假设条件不合理及增强后产生音乐噪声等缺点,其主要原因是忽略了交叉项的影响,Yang Lu 等人提出利用带噪语音的短时相位关系推导出三个向量的几何关系得出先验信噪比估计的语音增强算法.假设 $\{a_Y, a_X, a_D\}$ 、 $\{\theta_Y, \theta_X, \theta_D\}$ 分别是带噪语音信号、纯净语音信号、噪声信号的幅值和相位.将带噪语音、纯净语音、噪声信号映射到极坐标下,其极坐标形式如下:

$$a_Y e^{j\theta_Y} = a_X e^{j\theta_X} + a_D e^{j\theta_D} \quad (1)$$

由式(1)可做出带噪语音的几何关系图,如图1所示.

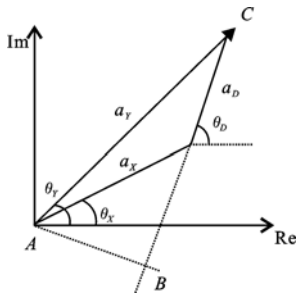


图1 语音的几何关系图

从图1中可知直角三角形ABC中体现了含噪语音信号、纯净语音信号和噪声信号三者之间的关系,根据几何知识知 $\overline{AB} \perp \overline{BC}$,由此 $\overline{AB} = a_Y \sin(\theta_D - \theta_Y) = a_X \sin(\theta_D - \theta_X)$ 推导出 $a_Y^2(1 - c_{YD}^2) = a_X^2(1 - c_{XD}^2)$,令 $c_{YD} \triangleq \sin(\theta_Y - \theta_D)$ 、

$c_{XD} \triangleq \cos(\theta_D - \theta_X)$ 得到关于含噪语音信号与噪声信号幅值谱的比值函数,定义增益函数为

$$H_{GA} = \frac{a_X}{a_Y} = \sqrt{\frac{1 - c_{YD}^2}{1 - c_{XD}^2}} \quad (2)$$

故估计得纯净语音功率谱为

$$|\hat{X}(\omega_k)|^2 = H_{GA}^2(\omega_k) \cdot |Y(\omega_k)|^2 \quad (3)$$

由式(3)可见,增益函数依赖于带噪语音信号(或纯净语音信号)与噪声信号之间的相位差估计,由于目前没有准确有效测定相位值的方法,可利用带噪语音信号与噪声信号的向量关系,进一步由三角函数余弦定理可得以下关系:

$$c_{YD} = \frac{a_Y^2 + a_D^2 - a_X^2}{2a_Y a_D} \quad (4a)$$

$$c_{XD} = \frac{a_Y^2 - a_X^2 - a_D^2}{2a_X a_D} \quad (4b)$$

分子分母同除以 a_D^2 得

$$c_{YD} = \frac{\gamma + 1 - \xi}{2\sqrt{\gamma}} \quad (5a)$$

$$c_{XD} = \frac{\gamma - 1 - \xi}{2\sqrt{\xi}} \quad (5b)$$

其中变量 $\xi \triangleq \frac{a_X^2}{a_D^2}$ 、 $\gamma \triangleq \frac{a_Y^2}{a_D^2}$ 分别表示先验信噪比和后验信噪比,由先验和后验信噪比表示的增益函数 H_{GA} 如下:

$$H_{GA}(\xi, \gamma) = \sqrt{\frac{1 - \frac{(\gamma + 1 - \xi)^2}{4\gamma}}{1 - \frac{(\gamma - 1 - \xi)^2}{4\xi}}} \quad (6)$$

当纯净语音信号和噪声信号的向量正交时(即 $c_{XD} = 0$),几何谱减法还原为传统谱减法,即当纯净语音信号和噪声信号两者不相关时的情况;当其他情况时,用传统谱减法处理就有误差,其忽略了相关项的影响,此时就会产生“音乐噪声”,因为纯净语音和噪声的相位关系对增强效果是有影响的,而几何谱减法能很好的还原纯净语音信号的幅度谱.

2.2 先验性噪比

基于当前帧的先验信噪比 $\hat{\xi}(l, k)$ 可以利用增强了的前一帧幅度谱估计先验性噪比 ξ :

$$\xi_l(l, k) = \hat{a}_X^2(l-1, k) / \hat{a}_D^2(l-1, k) \quad (7)$$

式中 $\xi_l(l, k)$ 表示语音信号第 l 帧第 k 个频率分量上的帧频率分量先验信噪比瞬时值,但瞬时先验信噪比仅利用了上一帧谱信息.由式(5a)得: $\xi = \gamma + 1 - 2\sqrt{\gamma}c_{YD}$ 可以利用上式中 ξ 和 γ 的真值关系及当前帧的谱信息来计算 ξ 的估计值,又因为 $-1 \leq c_{YD} \leq 1$,可知 ξ 的范围 $(\sqrt{\gamma} - 1)^2 \leq \xi \leq (\sqrt{\gamma} + 1)^2$. 将 ξ 的下

限值作为估计值即 $\hat{\xi}(l, k) = (\sqrt{\hat{\gamma}(l, k)} - 1)^2$, 综合基于前一帧和当前帧 ξ 的两种估计值的估计方程:

$$\hat{\xi}(l, k) = \alpha \cdot \left[\frac{\hat{a}_X(l-1, k)}{\hat{a}_D(l-1, k)} \right]^2 + (1 - \alpha) \cdot (\sqrt{\hat{\gamma}(l, k)} - 1)^2 \quad (8)$$

式中, α 是平滑系数, 取值介于 0.95 ~ 1.0 之间, 本实验中取 $\alpha = 0.98$, $\hat{a}_D(l, k)$ 是噪声谱的估计值. 式(8) 是结合上一帧和当前帧的加权平均的信噪比瞬时测量, 平滑系数 α 控制着上一帧和当前帧频谱信息.

2.3 后验性噪比

基于当前帧的后验信噪比 $\hat{\gamma}(l, k)$ 可以通过噪声谱的估计计算 $\hat{a}_Y^2/\hat{a}_D^2$ 获得, 对于 $\hat{\gamma}(l, k)$ 利用下面的瞬时估计:

$$\hat{\gamma}_l(l, k) = \left[\frac{\hat{a}_Y(l, k)}{\hat{a}_D(l, k)} \right]^2 \quad (9)$$

式中 $\hat{a}_D(l, k)$ 是采用 Martin's 最小跟踪算法^[7] 估计得到的噪声谱. 采用平滑手段可以限制后验估计信噪比 $\hat{\gamma}(l, k)$ 快速变化, 同时也限制了信号的过减和 $\hat{\gamma}(l, k)$ 过大, 带平滑系数 β 的后验信噪比 $\hat{\gamma}(l, k)$ 的估计方程:

$$\hat{\gamma}(l, k) = \beta \cdot \hat{\gamma}(l-1, k) + (1 - \beta) \cdot \min[\hat{\gamma}_l(l, k), 20] \quad (10)$$

式中, β 为平滑系数, 本实验中取 $\beta = 0.6$, $\min[\cdot]$ 用于限制 $\hat{\gamma}(l, k)$ 最大值不超过 13 dB (10 lg 20) 以避免信号过大衰减.

3 听觉掩蔽效应及掩蔽阈值的计算

3.1 听觉掩蔽效应

当两个响度不同的声音作用于人耳时, 响度较高的频率成分会影响到响度较低的频率成分, 使其变得不易感知, 这种现象称为掩蔽效应. 即较弱声音(被掩蔽音)的听觉感受会被较强声音(掩蔽音)掩蔽. 在语音增强中同样存在掩蔽效应, 语音信号的存在使得噪声的听阈值上升, 且噪声的听阈值与语音信号的能量成正比关系, 当语音信号能量较大时, 使得噪声很难被察觉. 利用听觉掩蔽效应的这个特性, 对带噪语音进行增强时, 只需将残留噪声强度控制在掩蔽阈值之下, 使人耳感觉不到这些噪声, 这样在消除噪声的同时可以减少语音失真和不必要的语音畸变. 根据上面的叙述, 计算掩蔽阈值就成了掩蔽的关键.

3.2 掩蔽阈值的计算

一般将 20 Hz 到 16 kHz 的频率范围划分为 24 个临界频带(CB), 临界频带的单位为 Bark. 在此映

射下, 频率 f 和线性 bark 刻度 Z 的函数关系:

$$z = 13 \arctan(0.76 \times 10^{-3} f) + 3.5 \arctan[(f/7500)] \quad (11)$$

计算噪声掩蔽阈的掩蔽模型有很多种, 本文主要研究 Johnston 掩蔽模型.

(1) 统计短时功率谱在每个临界带的能量临界能量:

$$B_i = \sum_{k=b_{li}}^{b_{hi}} \hat{S}(l, k) \quad (12)$$

式中, $\hat{S}(l, k)$ 粗率估算的语音, l 表示语音信号的帧号, b_{li} 和 b_{hi} 分别表示临界带 i 的下限和上限.

(2) 计算扩展临界带能量 C_j

$$C_j = \sum_{i=1}^{CB} B_i * SF_{ij} \quad (13)$$

式中, 扩展函数 SF_{ij} 是临界带之间 Bark 谱对扩展谱定量的描述, 定义如下:

$$10 \lg SF_{ij} = 15.81 + 7.5(\Delta + 0.474) - 17.5 \sqrt{1 + (\Delta + 0.474)^2} \text{ dB} \quad (14)$$

式中, $\Delta = i - j$ 表示两个临界带频带号的差值, CB 为临界频带数, 且 $|\Delta| \leq CB$.

(3) 计算掩蔽阈值偏移量

$$O_i = \alpha \cdot (14.5 + i) + (1 - \alpha) \cdot 5.5 \quad i = 1, 2, \dots, CB \quad (15)$$

式中, α 是音调系数, 用来衡量某段带噪语音是噪声和纯音特性, 其值 $\alpha = \min\left[\frac{SFM_{dB}}{-60}, 1\right]$, SFM_{dB} 是谱平坦度, 其值 $SFM(i)_{dB} = 10 \lg(G_{m_i}/A_{m_i})$ 其中 G_{m_i} 和 A_{m_i} 分别为功率谱的几何平均值和算术平均值. 当 $SFM_{dB \max} = -60$ dB 时, 信号完全类似于单音; 若 $SFM = 0$ dB, 则信号完全类似于噪声.

(4) 根据掩蔽阈值偏移量 O_i 和扩展临界带能量 C_j 得扩展掩蔽阈估计值:

$$T_i' = 10 \lg \langle C_i \rangle - \langle O_i/10 \rangle \quad (16)$$

(5) 计算绝对听阈值

$$T_a = 3.64 (f/1000)^{-0.8} - 6.5 e^{-0.6 \langle f/1000-3.3 \rangle^2} + 10^{-3} (f/1000)^4 \quad (17)$$

式中, f 的单位为 kHz.

(6) 最终阈值

通过上述几步, 将计算得到掩蔽阈估计值与绝对听阈值比较, 取两者的最大值作为第 i 频段的噪声掩蔽值

$$T_i = \max(T_i', T_a) \quad (18)$$

式中, T_i 的单位为 dB SPL (Sound Pressure Level). 由掩蔽特性可知, 语音信号在各个临界频带上具有

相同的掩蔽特性即其掩蔽值相等,故可将 T_i 扩展到各个频谱上,记为 $T(l, k) = T_i$.

4 基于听觉掩蔽效应改进的几何谱减算法

4.1 感知滤波器

带噪语音通过几何谱减法增强后,仍有一些残余噪声和语音畸变,在不降低语音的可懂度、增加语音失真度的情况下,可利用人耳听觉掩蔽特性掩蔽掉,不用全部消除,可根据听觉掩蔽效应计算的掩蔽阈值设计感知滤波器.假设增强后的语音信号

$$\hat{X}(l, k) = Q(l, k) \cdot X(l, k) \quad (19)$$

式中, $Q(l, k)$ 为感知滤波器.若使噪声不被人耳察觉,即残留的噪声功率谱能低于掩蔽阈值,感知滤波器满足

$$\begin{aligned} |Q(l, k)|^2 \cdot |D(l, k)|^2 &\leq T(l, k) \\ |Q(l, k)| &\leq 1 \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $T(l, k)$ 为掩蔽阈值, $D(l, k)$ 为背景噪声功率谱密度.采用 3.2 节中方法计算得阈值后,可设计感知滤波器模型为

$$Q(l, k) = \min \left\{ 1, \sqrt{\frac{T(l, k)}{|D(l, k)|^2}} \right\} \quad (21)$$

感知滤波器的目的是在频域上使信号频谱失真最小的情况下,使残留噪声的频谱能量小于掩蔽阈值,抑制大于噪声掩蔽阈的噪声频谱分量而保留在噪声掩蔽阈之下的噪声分量.

4.2 基于听觉掩蔽效应的几何谱减法算法流程

经过人耳掩蔽效应改进的几何谱减法,其系统结构框图如图 2 所示.

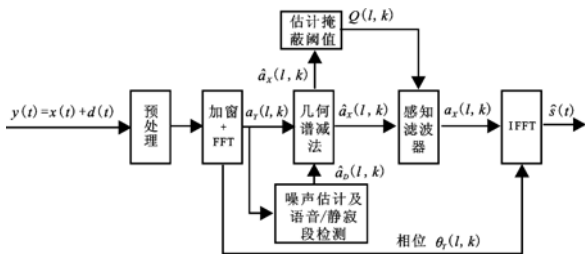


图2 基于听觉掩蔽效应改进的几何谱减

改进算法流程包括以下几步,即每一步均对每帧带噪语音处理:

step1: 对每帧带噪信号 $y(t) = x(t) + d(t)$ 进行 FFT, 计算出每帧 l 带噪语音的幅度谱 $a_Y(l, k)$ 及相位信息 $\theta_Y(l, k)$;

step2: 使用 Martin's 最小跟踪算法^[7] 估计噪声, 更新噪声信号的功率谱 $[\hat{a}_D(l, k)]^2$;

step3: 根据式(9)和式(10) 计算 $\hat{\gamma}_{GA}(l, k)$;

step4: 根据式(8) 用 $\hat{\gamma}_{GA}(l, k)$ 估算 $\hat{\xi}(l, k)$, 从 $\hat{\xi}(l, k)$ 到 $\xi_{\min}$ 中选一个小于 $\xi_{\min} = -26$ dB 的 $\hat{\xi}(l, k)$ 值;

step5: 根据式(5) 估算增益函数 $\hat{H}_{GA}(\hat{\xi}, \hat{\gamma}_{GA})$ ($\hat{H}_{GA}(\hat{\xi}, \hat{\gamma}_{GA}) \leq 1$);

step6: 根据式 $\hat{a}_X(l, k) = \hat{H}_{GA}(\hat{\xi}, \hat{\gamma}_{GA}) \cdot a_Y(l, k)$ 得到初步增强的信号的幅度谱 $\hat{a}_X(l, k)$;

step7: 利用估计的幅度谱 $\hat{a}_X(l, k)$ 根据式(20) 估计掩蔽阈值 T_i , 根据式(21) 设计感知滤波器 $Q(l, k)$;

step8: 在频域对 $\hat{a}_X(l, k)$ 按照式(19) 进行滤波, 得到最终的增强幅度谱的估值 $\hat{a}_X(l, k)$;

step9: 计算 $\hat{a}_X(l, k) \cdot e^{j\theta_Y(l, k)}$ ($\theta_Y(l, k)$ 为噪声信号的相位) 的 IFFT, 得还原后的语音信号 $\hat{x}(t)$.

带噪语音首先进行几何谱减法初步增强, 得粗率估算的语音, 再根据听觉掩蔽效应计算掩蔽阈值, 设计一个感知滤波器, 再将得到的初步增强的语音信号进行滤波, 得最终增强的语音信号.

5 仿真结果及分析

本实验语音数据均在实验室安静条件下录制, 语音采样率为 8 kHz、采样精度为 16 bits, 分帧时使用汉明窗且帧长 256 点、帧移 128 点, 在计算听觉掩蔽阈值时的临界带数为 24. 并按照信噪比 -5 dB、0 dB、5 dB、10 dB 将白噪声、沃尔沃汽车噪声和工厂噪声与纯净语音相混合, 得到实验所需的带噪语音, 其中噪声来自 Noisex-92 数据库. 实验对比了 3 种不同的增强方法的性能, 分别是传统谱减法、几何谱减法、基于听觉掩蔽效应改进的几何谱减算法(本文方法). 基本谱减法算法增强后的语音残留噪声较多, 语音失真较大, 几何谱减法增强次之, 本文方法较前两种方法更为有效, 不仅减少了残留的音乐噪声, 而且提升了增强语音的输出信噪比, 在语音失真和残留噪声抑制方面有较好的效果, 提高了增强语音的清晰度和可懂度. 本文客观测试方法采用语音质量感知评价 PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality, PESQ) 及输出信噪比 oSNR (output SNR, oSNR).

PESQ 是计算增强语音与目标语音在响度谱上的距离, 它基于听觉感知模型, 与主观感知相联度很高, PESQ 的取值范围在 $[0.5, 4.5]$ 内, 其值越大, 表明语音的感知质量越高. 本文方法的增强语音 PESQ 值明显优于前两种方法, 说明其语音质量接近原始语音信号, 清晰度更高.

oSNR 是评价语音增强算法的最简单的客观指标,代表语音增强算法处理后语音与原始语音之间距离的一个全局指标,可在时域或频域中计算。oSNR 一般分为整体 SNR 和分段信噪比,相比分段信噪比,整体 SNR 更能反应全局噪声衰减、说明整体语音质量情况。本实验中使用整体 SNR 来衡量语音质量。oSNR 定义如下:

$$\text{oSNR} = 10 \times \lg \frac{\sum_{k=1}^K x^2(k)}{\sum_{k=1}^K [\hat{x}(k) - x(k)]^2} \quad (22)$$

式中, k 为采样点数, $x(k)$ 是纯净语音信号, $\hat{x}(k)$ 是增强算法处理后的信号, K 是信号的总长度。oSNR 的值越大,表明语音质量越高。仿真结果表明,本文方法的增强效果优于基本谱减法、几何谱减法,噪声被更好地消除,信噪比得到了进一步提高,尤其是对于输入为低信噪比语音时,本文方法对信噪比的改善效果更加明显。

最后进行主观试听测试,经过实验室六位同学的随机试听,均表示本文方法增强后的语音几乎不存在残留“音乐噪声”和背景噪声,且相比其他两种算法语音的畸变程度更小,话语更清晰,这与 PESQ 的结果相一致。

6 结束语

本文推导了一种利用短时相位关系的谱减法用于对语音增强的公式,并提出了一种结合听觉掩蔽效应的改进算法,客观评价和主观听音测试都表明:在低信噪比环境下,本文提出的方法能更有效地抑制背景噪声及减小语音畸变。

参考文献:

- [1] Loizou P C, Ma J. Extending the articulation index to account for non-linear distortions introduced by noise-suppression algorithms[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(2): 986-995.
 - [2] Upadhyay N, Karmakar A. A perceptually motivated multi-band spectral subtraction algorithm for enhancement of degraded speech[C]//Computer and Communication Technology (ICCCT), 2012 Third International Conference on. India, IEEE, 2012: 340-345.
 - [3] 彭军, 王忠, 刘兴涛, 等. 基于多窗谱相关加权语音增强[J]. 计算机仿真, 2011, 28(3): 142-145.
 - [4] Ping W. An improved spectral subtraction algorithm based on auditory masking in voice human-computer interaction[C]//Mechatronics and Automation (ICMA), 2010 International Conference on. China: Xi'an, IEEE, 2010: 1938-1941.
 - [5] Cao L, Zhang T, Gao H, et al. Multi-band spectral subtraction method combined with auditory masking properties for speech enhancement[C]//Image and Signal Processing (CISP), 2012 5th International Congress on. India: Guwahati, IEEE, 2012: 72-76.
 - [6] Lu Yang, Loizou P C. A geometric approach to spectral subtraction[J]. Speech communication, 2008, 50(6): 453-466.
 - [7] Martin R. Noise power spectral density estimation based on optimal smoothing and minimum statistics[J]. Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on, 2001, 9(5): 504-512.
- 作者简介:**
- 万义龙 男, (1989—), 硕士研究生. 研究方向为语音信号处理、语音识别.
- 张天骐 男, (1971—), 教授. 研究方向为语音信号处理、通信信号的调制解调、盲处理、神经网络实现以及 FPGA、VLSI 实现等.
- 王志朝 男, (1987—), 硕士研究生. 研究方向为宽带信号的波达方向估计、阵列信号处理.
- 金 静 女, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为变速率语音编码、低速率语音编码.
-
- (上接第 79 页)
- [3] 余林琛, 章巍, 林强, 等. RS 纠错码在云存储中的应用[J]. 微电子学与计算机. 2011, 28(8): 234-236.
 - [4] Plank J S, Xu L. Optimizing cauchy reed-solomon codes for fault-tolerant network storage applications[C]//Proc. of the 5th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, Cambridge, MA, 2006: 38-46.
 - [5] 王意洁, 卢锡城. 基于 Tornado 码的复制算法[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(3): 39-42.
 - [6] 周游, 刘鹏, 杨盛祥, 等. 基于私有云的数据冗余技术研究[J]. 电脑知识与技术, 2011(1): 16-19.
 - [7] 慕建君, 路成业, 王新梅. 关于纠错码的研究与进展[J]. 电子与信息学报, 2002(9): 1276-1281.
- 作者简介:**
- 李琳琳 女, (1974—), 博士, 副教授. 研究方向为指挥自动化系统工程与计算机应用.
- 王庆超 男, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为云存储与计算机应用.