

基于压缩感知和正弦字典的语音编码新方案

李尚靖¹, 朱琦^{1,2}, 朱俊华¹

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要:文中提出一种压缩感知框架采样下的语音编码方案。根据压缩感知原理,利用行阶梯矩阵投影产生的观测序列保留了部分语音信息的时域特征,利用正弦字典和匹配追踪算法对观测序列进行建模,对于每帧观测序列的模型参数,根据各自特性采用合适的编码方式进行编码。在解码端对解码后的观测序列利用基追踪算法重构成语音,并后置低通滤波器提高合成语音的人耳听觉效果。仿真实验表明,提出的编码方案在2.8~5.7 kbps时得到的合成语音平均MOS分为2.81~3.23,在压缩感知框架下取得了较好的语音编码效果。

关键词:压缩感知;行阶梯观测矩阵;正弦字典;参数编码;矢量量化

中图分类号: TN912.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2015)04-0188-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2015.04.043

A New Scheme of Speech Coding Based on Compressed Sensing and Sinusoidal Dictionary

LI Shang-jing¹, ZHU Qi^{1,2}, ZHU Jun-hua¹

(1. College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Jiangsu Key Lab of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: A novel speech coding method based on compressed sensing is proposed in this paper. Based on compressed sensing theory, the row echelon matrix retains parts of speech time domain features in the measurements, and utilize a sinusoidal dictionary and matching pursuit for measurements sequence modeling. The model parameters are encoded by appropriate methods respectively. At the decoder, basis pursuit algorithm employs the decoded measurements for synthesized speech reconstruction. A rear low-pass filter is adopted to improve auditory effects. Simulation results show the average MOS scores of the synthesis speech are between 2.81~3.23 in low bit rate (2.8~5.7 kbps), which achieves a preferable coding effect in compressed sensing framework.

Key words: compressed sensing; row echelon matrix; sinusoidal dictionary; parameter coding; vector quantization

0 引言

压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论^[1-3]是近年来兴起的一种压缩采样技术,并且完全打破了奈奎斯特采样定理采样率必须大于或等于信号最高频率两倍的限制。CS理论指出,如果信号在某一变换域是稀疏的或可压缩的,那么就可以通过观测将高维信号投影到低维空间,并可以通过重构来近似无损地恢复原信号。这一过程可大大降低数据采样率,真正实现

“边采样边压缩”的效果,这无疑非常具有吸引力。自CS相关理论提出以来,CS在信源编码、图像处理、传感器网络和盲源分离^[4-7]等领域得到了广泛的研究和应用。然而,压缩感知框架下的语音编码研究目前还处于起步阶段,文献[8]利用小波变换和CS对语音进行编码,但是对奈奎斯特采样下的语音信号首先做小波变换后,再利用CS进行数据压缩,并没有利用CS“边采样边压缩”的特性。文献[9]利用CS技术得到

收稿日期:2014-06-03

修回日期:2014-09-04

网络出版时间:2015-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271335);国家重点基础研究发展计划(2011CB302303)

作者简介:李尚靖(1989-),男,硕士研究生,研究方向为压缩感知、语音信号处理;朱琦,教授,研究方向为下一代移动通信技术、无线宽带接入。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150223.1235.025.html>

了语音信号的稀疏线性预测模型,取得了较好的编码效果,但同样没有利用 CS 投影采样。

针对以上问题,文中提出一种基于压缩感知和正弦字典的语音编码方案。首先,利用行阶梯矩阵对语音进行观测投影,并且利用正弦字典对每帧语音观测序列进行建模。然后,对得到的三种模型参数依据其不同的特性选择相应的编码方式。在解码端利用相同的正弦字典和解码后的模型参数恢复观测序列,并利用基追踪算法重构成语音。最后,利用后置低通滤波器改善压缩感知重构时对合成语音高频能量提升所带来的影响,提高合成语音质量。仿真实验结果表明,该算法在 2.8 ~ 5.7 kbps 时得到的合成语音平均 MOS 分为 2.81 ~ 3.23,在压缩感知框架下取得了良好的语音编码效果。

1 压缩感知理论简介

压缩感知理论由 Candes, Donoho 等在 2006 年提出,该理论与被广泛接受的奈奎斯特理论完全不同,可以在采样的同时达到压缩数据的效果。压缩感知理论指出如果信号在某些变换域下是稀疏的,信号就可以利用远低于奈奎斯特采样率的采样速率得到观测序列,并可以通过重构精确恢复出原信号。压缩感知理论主要包括三个部分:投影矩阵、稀疏基和重构算法^[10]。

假设原始信号 $\mathbf{x} \in R^n$, 正交基 $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n \mid \psi_i \in R^n\}$, 则信号可表示为 $\mathbf{x} = \Psi\boldsymbol{\theta}$ 。如果系数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 中只有 k 个非零系数,即 $\|\boldsymbol{\theta}\|_0 = k$, 则称信号是 k -稀疏的。

CS 理论指出,可以通过随机投影对信号采样,产生 m ($m < n$) 个观测值 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, 投影过程可表示为

$$y_m = \sum_{i=1}^n \varphi_m \cdot x_i, 1 \leq m < M < N \quad (1)$$

矩阵 $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ 称为投影矩阵,由 m 个正交随机向量组成。如果矩阵 Φ 和 Ψ 满足有限等距特性(RIP),则当 $M > k \log N$ 时,通过低维观测序列 \mathbf{y} 可以精确恢复出原信号 \mathbf{x} 。传统的投影矩阵主要包括高斯随机矩阵、部分傅里叶矩阵和部分哈达玛矩阵。根据叶蕾的研究^[11],对于语音压缩感知,行阶梯矩阵能够保留语音的部分特性。

图 1 所示的行阶梯矩阵投影下的观测序列呈现明显的周期性,自相关函数证明观测样值间相关性较强,有利于对语音观测序列建模;并且利用行阶梯矩阵作为投影矩阵的重构性能优于传统随机矩阵,因此选择行阶梯矩阵作为观测矩阵。压缩比为 1:4 的行阶梯矩阵如式(2)所示。

$$\Phi = \begin{pmatrix} 111100000000 \cdots 0 \\ 000011110000 \cdots 0 \\ \cdots \\ 0 \cdots 000000001111 \end{pmatrix} \quad (2)$$

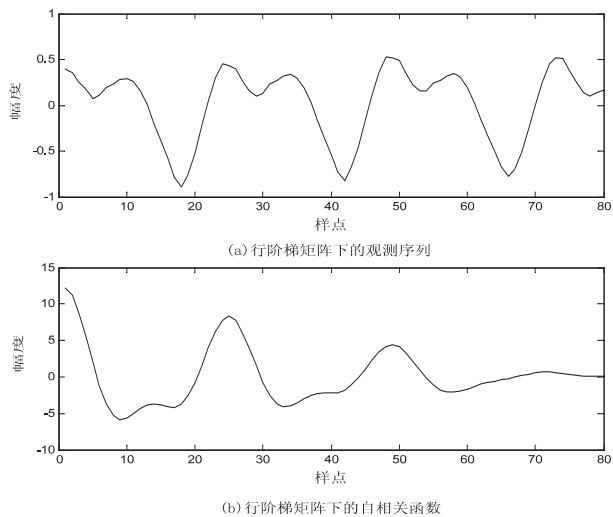


图 1 行阶梯矩阵下观测序列及自相关函数

从观测序列 \mathbf{y} 恢复原信号 \mathbf{x} 可通过一系列优化问题求解式(3)得到。

$$\min_{\boldsymbol{\theta}} \|\boldsymbol{\theta}\|_p \quad \text{s. t.} \quad \mathbf{y} = \Phi\mathbf{x} = \Phi\Psi\boldsymbol{\theta} \quad (3)$$

由于当 $p = 0$ 时,该问题是一个 NP 难问题且极不稳定。Donoho 等指出,当 $p = 1$ 时求解一个更加简单的 l_1 优化问题会产生同等的解。常见的重构算法主要包括:基追踪算法(Basis Pursuit, BP)、匹配追踪算法(Matching Pursuit, MP)、迭代阈值算法(Iterative Thresholding Methods, ITH)。

2 基于压缩感知和正弦字典的语音编码新方案

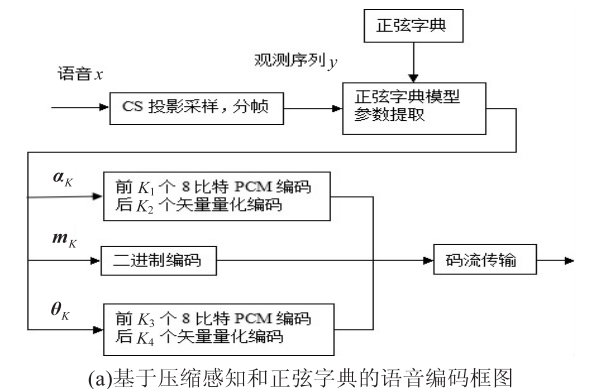
2.1 基于压缩感知和正弦字典的编解码系统

虽然利用压缩感知技术可以降低语音信号的采样率,压缩数据量,且投影得到的观测序列减少了信号内的部分冗余信息,但观测序列的信息量仍大大高于语音本身的数据量,这意味着需进一步对观测序列进行压缩。

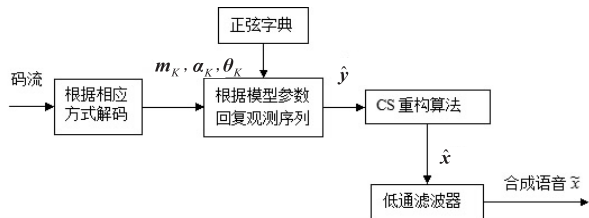
文中利用行阶梯矩阵对语音信号进行观测,保留了语音信号的部分时域特征。传统正弦模型将语音表示为若干正弦波叠加的形式,广泛应用于低速率语音编码系统^[12]。文中将压缩感知和正弦模型结合起来,得到了基于压缩感知和正弦字典的语音编解码方案,如图 2 所示。

如图 2(a)所示,在编码端输入语音首先通过行阶梯矩阵投影采样,并分帧得到语音信号的观测序列。通过匹配追踪算法在正弦字典中计算得到一帧观测序列的序号、幅度和相位三类参数,并将各类 K 个参数按

选取顺序排序组成序号向量 \mathbf{m}_k 、幅度向量 α_k 和相位向量 θ_k 。利用二进制编码对原子序号向量 \mathbf{m}_k 中的每一个标量编码;利用 8 比特脉冲编码调制 (Pulse Code Modulation, PCM) 编码来量化前 K_1 个原子的幅度参数和前 K_3 个原子的相位参数;最后,对余下的 K_2 个幅度参数和 K_4 个相位参数分别利用训练的码本进行矢量量化编码。幅度码本和相位码本由大量的语音通过 LBG 算法学习得到。



(a) 基于压缩感知和正弦字典的语音编码框图



(b) 基于压缩感知和正弦字典的语音解码框图

图 2 编解码框图

在解码端,如图 2(b)所示,首先通过各自对应的解码方式得到一帧语音的 K 个序号、幅度和相位信息。借助存储在解码端的正弦字典,通过线性叠加恢复出观测序列 $\hat{\mathbf{y}}$,采用 BP 算法重构出合成语音信号 $\hat{\mathbf{x}}$,并利用后置低通滤波器提高合成语音的听觉质量。

2.2 语音观测序列正弦字典模型

正弦模型首先分析语音帧的基音及谐波成分,并试图获得这些谐波成分和相位的信息,通过正弦波序列叠加来描述语音信号,对于给定的语音帧表示如下:

$$s(n) = \sum_{i=1}^L A_i \cos(w_i n + \varphi_i) \quad (4)$$

其中, A_i 和 φ_i 分别表示某一频率 w_i 正弦波分量的幅度和相位; L 表示正弦波的数量。

然而,从各种正弦波分量中选出与观测序列最匹配的分量并不是一件简单的事,必须引入一种波形选择过程,以便从大量的正弦分量中选择最适于分解信号结构的分量。信号处理中的匹配追踪就是这样一种分量原子选择算法,它的模型如式(5)所示:

$$f(n) = \sum_{m=1}^M \alpha_m d_m(n) \quad (5)$$

其中, α 为展开系数; $d(n)$ 为展开函数。

对比式(4)和式(5),如果将展开函数设置为正弦波函数,产生一个由各种频率成分组合而成的正弦波字典^[13],利用匹配追踪算法对语音信号观测序列进行正弦字典分解。每次迭代可得到第 k 次迭代产生的 $\alpha_k, \mathbf{m}_k, \theta_k$ 。通过上述方法,经过 K 次迭代后得到 $3K$ 个正弦模型特征参数。当 $3K \ll N$ 时,观测序列得到了有效二次压缩。

对于语音观测序列正弦字典建模,关系到建模效果的主要有两个因素,正弦字典规模和匹配追踪算法中选取的原子个数。正弦字典规模越大,建模效果越好,但存储字典所需的内存也就越大,而且每次迭代时的最大相关性原子选择运行时间也就越长。综合考虑建模性能和建模时间,文中选取字典规模为 $M = 512$ 或 $M = 1\,024$,建模时匹配追踪选取参数个数为 $6 \sim 12$ 个。

2.3 正弦模型参数编码方案选择

在利用正弦字典和匹配追踪对语音观测序列建模后,得到该模型下的三类参数:原子序号 \mathbf{m} 、正弦波的幅度参数 α 和相位参数 θ 。对于原子序号,由于字典规模为 2 的指数幂次,即 $M = 2^p$,故用 p 个比特就可以准确表示,并且不可被压缩。对于每一次迭代中的正弦波的幅度和相位,若都进行 16 比特的量化,则数据量依然巨大,无法满足现代语音通信中低速率的要求。矢量量化广泛应用于语音编码中,将若干个标量数据构成一个矢量,对矢量空间给以整体量化,从而压缩了数据而不损失过多信息。但如果对每帧语音的 K 个相位或幅度进行联合矢量量化,则量化精度太低,大大影响了该模型的建模效果。综合考虑,选择一个合适的量化方法对这两个参数进行编码和压缩十分必要。仔细分析匹配追踪过程,发现每次迭代中求取正弦波幅度都和当前残差有一定联系,随着残差的逐渐减小,正弦波幅度也逐渐减小。不难得出越早得到的原子幅度,对建模性能的影响越大,需要较多比特来保证编码的准确性。通过前期分析实验数据,当固定语音观测序列匹配追踪中的迭代次数为 K 时,后 $2/3K$ 次迭代中大部分的幅度绝对值都小于 1,并随迭代次数的增大而减小,呈一定规律性。对于某些清音帧,其大部分幅度参数都低于 0.5。所以,可以对一帧中 K 个幅度参数的前 K_1 个进行标量量化,后 $K_2 = K - K_1$ 个参数进行联合矢量量化,这样既能保持较好的建模效果,又可以大大压缩码率。对于相位参数, K 个相位参数虽然在 $-\pi \sim \pi$ 之间随机分布,看似没有规律,但类似于幅度参数,在 K 次迭代中,迭代顺序越早获得的相位参数对建模的性能影响越大。借鉴幅度参数编码思想,可对前 K_3 个进行标量量化,同样利用联合矢量量化方法对后 $K_4 = K - K_3$ 个相位参数进行编码。

2.4 后置低通滤波器及数码率分析

虽然整体上合成语音信号和原始语音信号的欧氏距离十分接近,但由于 BP 重构算法,重构采用 l_1 范数,高频部分出现振荡,导致合成语音听起来有轻微的“兹兹”声,较为刺耳。为了降低重构算法对人耳听觉舒适度带来的影响,文中利用后置低通滤波器对合成语音信号进行后处理,低通滤波器传递函数为

$$H(z) = \frac{1 - \mu}{1 - \mu z^{-1}} \tag{6}$$

其中,参数 $\mu = 0.9$ 。

经过后置低通滤波的合成语音中“兹兹”声明显降低,听起来更为舒适。

文中固定分帧长度为 40 ms。当观测序列建模采用的正弦字典大小为 $M = 2^p$ 时,为了保证矢量量化准确性 and 适当的计算时间,规定矢量量化编码时幅度码本和相位码本的大小也均为 M 。当前 K_1 个幅度参数和前 K_3 个相位参数都采用 8 比特 PCM 编码时,基于压缩感知和正弦字典的语音编码方案码率计算为

$$\text{Bit Rate} = K \times p + (K_1 + K_3) \times 8 + 2p \tag{7}$$

3 仿真与结果分析

实验采用的数据来自中国科学院自动化所录制的语音库,取 50 段不同说话人的语音,共 100 句,原始语音的采样率为 16 kHz。以下所给出的实验结果均为平均值。解码后的合成语音质量用分帧信噪比和 MOS 分来评判性能。文中的 MOS 分均采用 ITU P. 862 标准计算得到,分帧信噪比为

$$\text{AFSNR} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P 10 \log_{10} \left(\frac{\|x_i\|_2^2}{\|x_i - \hat{x}_i\|_2^2} \right) \tag{8}$$

其中, P 为一段语音的总帧数。

根据 2.3 节的分析,规定 $K_1 = K/2 - 1, K_3 = K/2$ 。实验对男性语音和女性语音分别进行测试。为了验证对参数编码的有效性,第一个实验首先比较文中参数编码方法的合成语音的质量和未对参数进行压缩编码(16 比特/参数)的合成语音的质量。设定帧长为 40 ms,选取正弦字典大小 $M = 1\ 024$,匹配追踪算法选取参数个数 $K = 10$,则 $K_1 = 4$ 和 $K_3 = 5$ 。根据式(7),此方案相应的码率为 $[10 \times 10 + (4 + 5) \times 8 + 2 \times 10]/40 = 4.8\text{ kbps}$ 。并且为了进一步验证文中算法的有效性,将文中方案的实验结果与奈奎斯特标准采样下 FS-1016 的 4.8 kbps 标准 CELP 编码结果进行比较。结果如表 1 所示。

从实验结果中可以看到,对男生语音和女生语音采用文中提出的方法编码后信噪比分别下降 2.5 dB 和 2.3 dB,MOS 分分别下降 0.12 和 0.17。但编码后数据量下降了 55%,文中编码方案有效地控制了编码

的码率,但降低合成语音的性能不明显。在和 CELP 编码传输码率相同的情况下,文中编码方案在分帧信噪比和 MOS 分上都优于传统采样下的 CELP 编码。

表 1 文中基于压缩感知和正弦字典的语音编码方案的性能比较

	码率 /kbps	Male		Female	
		AFSNR /dB	MOS	AFSNR /dB	MOS
CELP	4.8	10.037 4	3.036	8.912 7	2.707
参数编码后合成语音	4.8	17.950 1	3.133	11.608 4	2.740
未参数编码合成语音	10.5	20.442	3.252	13.912	2.917

为了进一步验证基于压缩感知和正弦字典语音编码方案的性能,表 2 和表 3 分别给出了不同码率(对应的是不同字典大小和矢量量化维数)时,采用文中编解码方案,解码后男性和女性语音的重构信噪比和 MOS 分,码率均由式(7)计算得出。

表 2 基于压缩感知和正弦字典的语音编码方案码率与合成语音质量(男)

字典大小	参数 个数 K	PCM 量化个数		码率/ kbps	AFSNR /dB	MOS
		幅度 K_1	相位 K_3			
512	6	2	3	2.8	14.006 1	2.814
521	8	3	4	3.65	15.820 6	2.959
1 024	10	4	5	4.8	17.950 1	3.133
1 024	12	5	6	5.7	18.029 0	3.223

表 3 基于压缩感知和正弦字典的语音编码方案码率与合成语音质量(女)

字典大小	参数 个数 K	PCM 量化个数		码率/ kbps	AFSNR /dB	MOS
		幅度 K_1	相位 K_3			
512	6	2	3	2.8	9.640 2	2.572
521	8	3	4	3.65	10.993 9	2.644
1 024	10	4	5	4.8	11.680 4	2.740
1 024	12	5	6	5.7	11.909 0	2.858

从表 2 和表 3 中可以看出,随着字典大小的增加和匹配追踪算法选择参数的增多,男性和女性语音的重构性能都有所提升,各个码率的合成语音质量都在实用通信的最低标准以上。采用文中编码方案男性比女性语音的合成效果好,是因为女性语音的高频成分较多,导致在稀疏域上稀疏性较差,重构误差高于男性语音。但利用后置低通滤波器后,对男性语音和女性语音的合成语音质量都有一定的提升。

4 结束语

文中利用行阶梯矩阵投影语音观测序列,提出了一种基于压缩感知和正弦字典的语音编码方案。该方案利用正弦字典对行阶梯语音观测序列建模,并且对模型参数根据其特性采用不同的编码方式,对解码后

的重构语音利用后置低通滤波器提高听觉质量。实验结果表明,该方案既达到了较低数码率(2.8 ~ 5.7 kbps)又能够保证良好的合成语音质量,在相同速率下优于 CELP 合成语音质量。压缩感知以信号的稀疏性为前提,能找到更合适语音的稀疏域,必然能够提高压缩感知采样下语音编码方案的性能,尤其是女性语音的合成效果,这是后续进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(4): 1289–1306.
- [2] Donoho D L, Tsaig Y. Extensions of compressed sensing[J]. Signal Processing, 2006, 86(3): 533–548.
- [3] Candes E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21–30.
- [4] Kassim L A, Khalifa O O, Gunawan T S, et al. Compressive sensing based low bit rate speech encoder[C]//Proc of 2012 international conference on computer and communication engineering. [s. l.]: [s. n.], 2012: 302–307.
- [5] Li R, Gan Z L, Cui Z G, et al. Side information extrapolation using motion-aligned autoregressive model for compressed sensing based Wyner-Ziv codec[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2013, 7(2): 366–385.
- [6] Lustig M, Donoho D L, Santos J M, et al. Compressed sensing MRI[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 72–82.
- [7] Xu Tao, Wang Wenwu. A compressed sensing approach for underdetermined blind audio source separation with sparse representation[C]//Proc of IEEE/SP 15th workshop on statistical signal processing. Cardiff: IEEE, 2009: 493–496.
- [8] 叶蕾, 杨震, 郭海燕. 基于小波变换和压缩感知的低速率语音编码方案[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(7): 1569–1575.
- [9] Giacobello G, Christense M G, Murthi M N, et al. Retrieving sparse patterns using a compressed sensing framework: applications to speech coding based on sparse linear prediction[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(1): 103–106.
- [10] 石光明, 刘丹华, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070–1081.
- [11] 叶蕾, 杨震, 王天荆, 等. 行阶梯观测矩阵下、对偶仿射尺度内点重构算法下的语音压缩感知[J]. 电子学报, 2012, 40(3): 429–434.
- [12] 张文耀. 基于匹配跟踪的低速率语音编码研究[D]. 北京: 中国科学院软件研究所, 2002.
- [13] 严非, 杨震. 基于匹配追踪的语音压缩感知观测序列的正弦字典建模[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2014, 34(2): 27–31.

(上接第 187 页)

参考文献:

- [1] 李成严, 冯慧灵. 基于开源技术的 Web 应用架构研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(8): 27–29.
- [2] 张建军, 刘虎, 倪芳英, 等. 基于 SSH 整合架构的研究与应用[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2012, 35(6): 39–43.
- [3] Garrett J J. Ajax: a new approach to web application[EB/OL]. 2014-07-08. <http://www.adaptivepath.com/ideas/ajax-new-approach-web-applications>.
- [4] 湛湘倩, 狄文辉. 基于 J2EE 轻量级框架的移动卡类渠道销售管理系统[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(17): 4009–4011.
- [5] 李淑芳, 胡克寒, 张凤丽, 等. 基于 SSH2 框架的高校科研网络管理系统的实现[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(7): 195–196.
- [6] 张建军, 刘虎, 倪芳英. 基于 SSH 与 Highcharts 的整合架构的 Web 应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(9): 245–247.
- [7] 张颖超, 宗雷, 叶小岭. AJAX 技术与 J2EE 集成的研究与应用[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(4): 106–107.
- [8] 拓守恒. 基于 Flex+Spring+Hibernate 框架技术的 RIA 教学测评系统的设计与实现[J]. 电脑开发与应用, 2009, 22(9): 20–22.
- [9] Orchard L M, Pehlivanian A, Koon S, et al. Professional JavaScript frameworks: prototype, YUI, ExtJS, Dojo and MooTools[M]. [s. l.]: Wrox Press Ltd., 2009.
- [10] 张建军, 刘虎. 基于 ExtJS 的 J2EE 轻量级框架的研究与应用[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(4): 73–76.
- [11] 李天鸣, 何月顺. 基于 ExtJS 技术与 SSH 框架的权限管理研究[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(5): 165–167.
- [12] 张鹏伟, 陈景霞, 张文平, 等. 基于 ExtJS 和 SSH 的 Web 应用架构的研究与实现[J]. 陕西科技大学学报: 自然科学版, 2010, 28(6): 111–115.
- [13] Zhang Junfeng, Wang Jianxiong, Jia Xinru. Design and implementation of data maintenance system based on ExtJS[J]. Railway Computer Application, 2010, 19(1): 27–30.
- [14] Zhang X X, Pan J C, Wang J. Design and implementation of workflow creation and scheduling mechanism on collaborative system[J]. Advanced Materials Research, 2013, 717: 854–858.

基于压缩感知和正弦字典的语音编码新方案



作者：[李尚靖](#)，[朱琦](#)，[朱俊华](#)，[LI Shang-jing](#)，[ZHU Qi](#)，[ZHU Jun-hua](#)
作者单位：[李尚靖, 朱俊华, LI Shang-jing, ZHU Jun-hua\(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京, 210003\)](#)，[朱琦, ZHU Qi\(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003\)](#)
刊名：[计算机技术与发展](#)[ISTIC](#)
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)
年，卷(期)：2015(4)

引用本文格式：[李尚靖. 朱琦. 朱俊华. LI Shang-jing. ZHU Qi. ZHU Jun-hua 基于压缩感知和正弦字典的语音编码新方案\[期刊论文\]·计算机技术与发展 2015\(4\)](#)