

语音信号的混沌遮掩及其正定盲提取算法

王尔馥, 郑远硕, 陈新武, 刘晓珍

(黑龙江大学电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 利用小波变换提取语音信号的能量聚集带, 将其隐藏在混沌载体信号中进行传输, 设计一种盲提取算法实现不同混沌动力学系统下语音信号的有效提取。以 3 种不同维数的混沌动力学系统为背景, 仿真实验定性和定量地分析了所提出算法的性能, 验证了噪声环境下算法的可靠性, 证明盲提取算法可作为对混沌保密通信系统保密性验证的有效方法。

关键词: 小波变换; 语音信号; FastICA 算法; 混沌系统

中图分类号: TN910

文献标识码: A

Chaotic hiding and its positive definite blind extraction algorithm of speech signal

WANG Er-fu, ZHENG Yuan-shuo, CHEN Xin-wu, LIU Xiao-zhen

(Electronic Engineering College, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: The wavelet transform was used to extract energy accumulation zone of speech signal hidden in the chaotic carrier signal for transmission, and a blind extraction algorithm was designed to achieve speech signal extraction under different chaotic dynamical systems. Using three different dimensions of the chaotic dynamic system as the background, simulation experiment analysed the performance of the proposed algorithm in aqualitative and quantitative ways, and verified the algorithm's reliability under the noise environment that prove the blind extraction algorithm can be used as an effective method of security verification of chaotic secure communication system.

Key words: wavelet transform, speech signal, FastICA algorithm, chaotic system

1 引言

语音是人类最常用、最便捷的交流方式, 语音信号的分离与提取已成为学者们研究的热点问题, 以此为背景出现了盲信号处理这一学科分支。然而, 随着信息交换方式的日益更新, 信息安全问题成为摆在学者面前一个亟待解决的研究课题。对语音信号采用有效的载体进行遮掩传输, 在接收端对期望信号进行盲提取, 可以解决语音信息传输中被截获、侦听所导致的信息泄露问题, 保障信息传输的安全, 相应的盲提取算法更可以作为验证混沌信号保密通信系统传输能力的一种手段。

混沌是非线性科学中发展活跃、应用前景广阔的一个领域。自 19 世纪 70 年代以来, 混沌信号处理在理论上取得了很大进展^[1,2], 在工程领域中也得到了一定应用^[3], 特别是用于保密通信传输, 可达到对传输信号加密和遮掩的效果。

国内外有很多学者对盲分离算法进行了研究, 如海洋杂波背景下小目标信号的提取、利用经验模态分解及小波变换实现混沌背景下的谐波信号盲分离^[4,5]。Vincent^[6]采用 ICA 技术根据音频配乐分离出不同的乐器以实现对音乐录音的交互式修改。国内在该领域也取得了一定的成绩, 成谢锋等^[7]提出对混沌信号作经验模态分解 (EMD), 从而实现混沌

收稿日期: 2016-05-13; 修回日期: 2016-06-20

通信作者: 王尔馥, efwang_612@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571181); 博士后研究人员落户黑龙江科研启动基金资助项目 (No.LBH-Q14136)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571181), Postdoctoral Research Foundation of Heilongjiang Province (No.LBH-Q14136)

信号的提取。孟宗等^[8]利用小波半软阈值对故障信号进行消噪处理，并采用 JADE 算法对信号进行盲源分离。林秋华等^[9]利用欠定盲分离问题的难解性，提出一种通过构造欠定加密混合矩阵的方法对语音信号进行加密，在提高安全性的同时保持了优良的音频质量。但在上述研究中，没有运用非平稳信号处理手段挖掘混沌信号和语音信号各自的时频能量聚集特性，更没有考虑对语音信号进行混沌遮掩及保密传输。

本文首先基于时频分析理论，利用复 Morlet 小波对语音信号和混沌系统进行分析，挖掘语音信号和混沌信号的时频能量聚集特性；然后，利用混沌信号的高能量和宽频谱特性，将语音信号隐藏在混沌系统的相应维度信号中，实现语音信号的混沌遮掩和保密传输；最后，借助盲源分离中的相关算法，对混合语音信号进行提取，验证混沌遮掩保密传输的安全性。

2 语音信号与混沌载体的时频分析

为了降低环境噪声的干扰，选择元音因素的语音库来保证算法的有效性及可对比性。本文选取国际标准语音库——TIMIT 语音库中的 SA₁ 和 SA₂ 语音作为待传输信号，图 1 和图 2 分别为语音 SA₁ 和 SA₂ 的波形。

语音信号的幅值和频率比较低，为了实现语音信号的保密传输，需要选择合适的混沌信号作为载体对其进行遮掩。从信号能量角度，只要语音信号的能量聚集带能够基本被混沌信号掩盖，其传输的保密性就可以保证。由于语音信号属于非平稳信号，傅里叶变换在此具有局限性，因此选择时频分析对语音信号进行处理，本文采用复 Morlet 小波对其进行分析。语音信号的采样频率取为 $f_s = 8\ 000\ \text{Hz}$ 。

这 2 路语音信号的频率分布范围比较广，但集中在频率 500~600 Hz 的信号幅值相对较高，称之为能量聚集带。

本文分别选取典型的二维 Henon 混沌系统、三维 Chen 混沌系统和四维 Qi 超混沌系统作为载体，从有效性及普适性这 2 方面对其进行分析。3 种混沌系统的动力学方程如式(1)~式(3)所示^[10]。

$$\begin{cases} x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + y_n \\ y_{n+1} = bx_n \end{cases} \quad (1)$$

其中， a, b 为系统参数，当参数值取 $a=1.4, b=0.3$ 且初值 $x_0 = y_0 = 0.4$ 时，Henon 系统处于混沌状态。

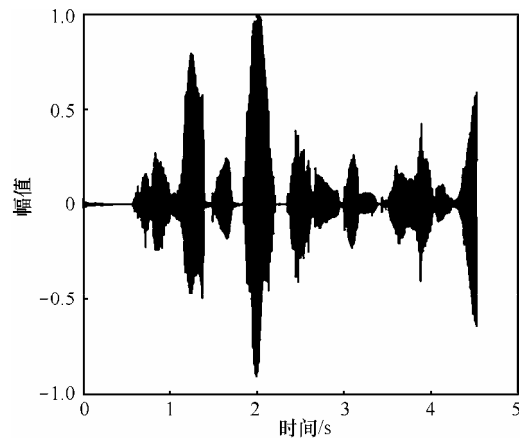


图 1 语音 SA₁ 的波形

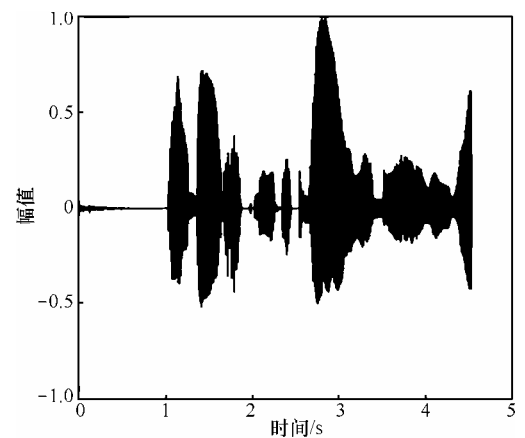


图 2 语音 SA₂ 的波形

Chen 混沌系统在实际安全通信中的应用广泛，它是三维自治系统，其动力学方程式为^[11]

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a(y - x) \\ \frac{dy}{dt} = (c - a)x - xz + cy \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz \end{cases} \quad (2)$$

其中， a, b, c 为系统的参数，当参数值取为 $a = 35, b = 3, c = 28$ 时，Chen 系统处于混沌状态。

Qi 系统是一个四维的超混沌系统，其动力学行为比一般的混沌系统更加复杂，其动力学方程式为^[12]

$$\begin{cases} x_1 = a(x_2 - x_1) + x_2x_3x_4 \\ x_2 = b(x_1 + x_2) - x_1x_3x_4 \\ x_3 = cx_3 + dx_1x_2x_4 \\ x_4 = rx_4 + x_1x_2x_3 \end{cases} \quad (3)$$

与维数较低的系统不同，非线性项存在于每个表达式中，其作为系统输出参数，用来控制输出。其中，

x_1, x_2, x_3, x_4 为系统的状态变量; a, b, c, d, r 为可以控制混沌系统状态的参数。当 $a = 50, b = 4, c = -13, d = 4, r = -20$, 初值 $x_1 = x_2 = x_3 = 1.01, x_4 = 1$ 时, Qi 超混沌系统有 2 个正的李雅普诺夫指数, 系统处于超混沌状态。3 种混沌的时域波形如图 3~图 5 所示。

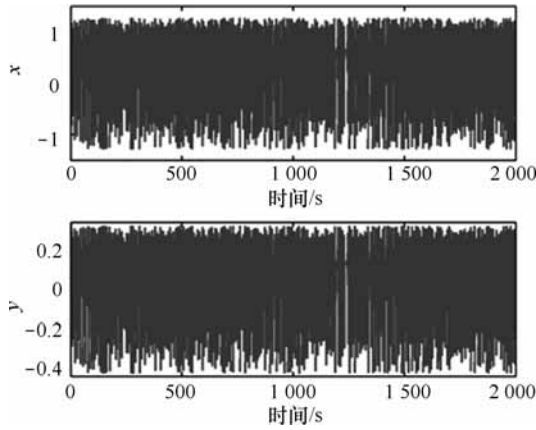


图 3 Henon 混沌系统时域波形

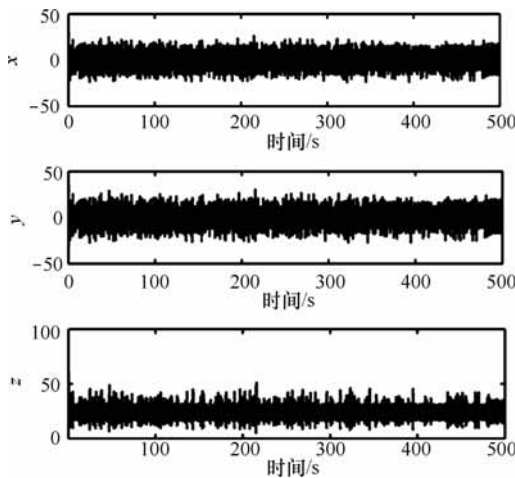


图 4 Chen 混沌系统时域波形

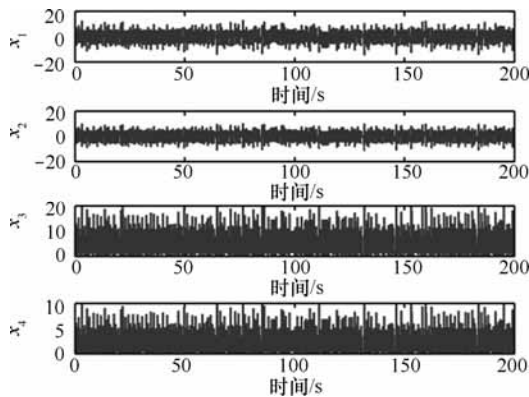


图 5 Qi 混沌系统时域波形

Henon 混沌系统的能量强度分布相对均匀, 在 0~4 000 Hz 频率范围内能量强度主要集中在 0.8 J 左

右; 而三维 Chen 混沌系统的能量强度主要集中在 100~300 Hz, 在这个频率范围内能量最高可达到 60 J, 主要集中在 200 Hz 左右, 而在 300~4 000 Hz 频率范围内能量分布都比较均匀, 能量强度主要集中在 6 J 左右; Qi 超混沌系统的能量聚集带主要分布在 0~200 Hz, 其中, 能量最高可达到 23 J, 不过只有小部分主要集中在 50 Hz 左右, 其余部分的能量大概在 10 J 左右, 而在 200~4 000 Hz 能量聚集带内能量分布比较均匀, 这一特点和 Chen 混沌系统相类似, 能量强度大概在 3 J 左右。

3 混沌遮掩语音传输系统的模型建立

3.1 模型建立

本文考虑在信道加噪的正定系统下对隐藏在混沌信号中的语音信号进行盲提取, 系统的数学模型可以抽象, 如图 6 所示。

不考虑传输延时, 并假设收发天线数目相等, 得到瞬时混合模型下的正定盲源提取模型为

$$Y = A \times S + N \quad (4)$$

其中, A 为 $N \times N$ 阶的未知信道混合矩阵, 其随机产生; $S = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$ 表示 N 个未知的源信号向量, 为了实现信号隐藏保密传输, 其中, 某一个向量选择为混沌信号, 以将语音信号有效地隐藏在混沌信号的能量聚集带中, 使其达到保密传输的目的; $N = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$ 表示信道中的加性高斯白噪声。分离模型的数学表达式为

$$Y' = W \times Y = W \times A \times S + W \times N \quad (5)$$

其中, W 为接收端采用盲提取算法所得到的分离矩阵; $Y = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_M(t)]^T$ 表示接收端的观测信号向量。线性混合盲源分离的目的是克服加性噪声的影响, 通过改变分离矩阵 W , 使分离信号 Y' 与源信号 S 的波形具有一致性, 即

$$Y' = P A S \quad (6)$$

其中, P 为置换矩阵, A 为对角矩阵, 盲源分离允许存在排列顺序和信号幅度的不确定性。

3.2 仿真流程及算法评价

根据小波变换得到的语音和混沌信号的时频特性, 结合系统的数学模型, 设计得到本文的仿真流程, 如图 7 所示。首先利用小波变换分别分析语音信号和混沌信号的时频分布特性, 以此来验证语

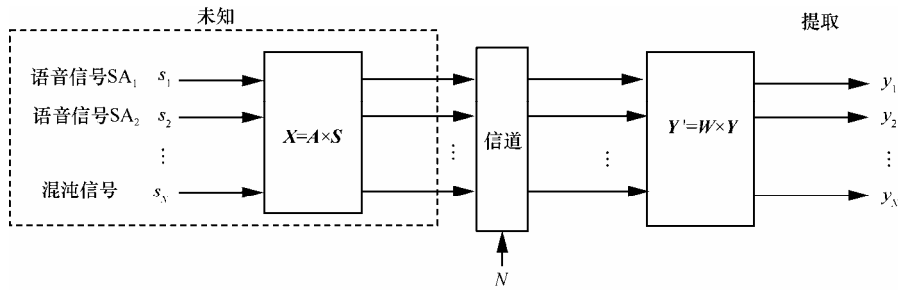


图 6 系统数学模型

音信号的成功遮掩;继而将 2 种信号混合进入信道,在信道中加入加性高斯白噪声;最后接收端利用 FastICA 算法对混合信号进行盲分离,通过对比分析混合分离前后的语音信号的波形图和相似系数矩阵。当由相似系数构成的相似系数矩阵的每一列有一个元素大于 0.9,其他元素均接近 0 时,说明实现了混沌背景下含噪语音信号的盲分离;反之则无法实现混沌背景下含噪语音信号的盲分离。

号和分离信号,相关系数的表达式为

$$\xi_{ij} = \xi(S_j, y'_i) = \frac{\left| \sum_{t=1}^n y'_i(t) S_j(t) \right|}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (y'_i(t))^2 \sum_{t=1}^n S_j^2(t)}} \quad (8)$$

当 2 个信号完全相关时, $\xi_{ij} = 1$; 当 2 个信号完全独立时, $\xi_{ij} = 0$ 。 ξ_{ij} 越接近 1 表明源信号和分离信号之间的相似程度越高,即该算法的分离误差越小,分离性能越好。

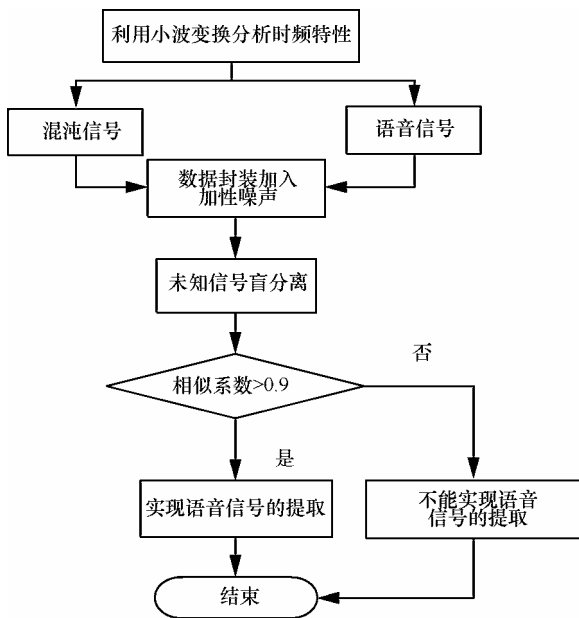


图 7 算法流程

接收端采用盲源分离理论中经典的 FastICA 算法,其分离矩阵及归一化的分离矩阵表达式为

$$W^* = E\{Xg(W^T X)\} - E\{g'(W^T X)\}W$$

$$W = \frac{W^*}{\|W^*\|} \quad (7)$$

其中, g 为系统全局矩阵, E 为数学期望,数学期望必须用它们的统计值来代替。本文采用相关系数来评价算法的提取性能,设 S_j 与 y'_i 分别表示源信

4 仿真实验及性能分析

为了验证算法的有效性,本文考虑 2 路语音信号和 1 路混沌信号混合分离的情况,语音库中所选取的 2 路语音信号的说话者均为女性,其音色和音调极为相似,一定程度上增大了算法的提取难度。需要重点指出的是,本文模型里的噪声为加性高斯白噪声,而实质上模型里所用到的载体——混沌信号有类噪声的性质,其能量巨大,但由于混沌系统的能量无法计算,因此下文中所提及的参数信噪比(SNR)仅涵盖了加性高斯白噪声,并没有考虑混沌信号的能量。即如果考虑混沌系统的能量,实际的 SNR 将远远低于仿真中所用的参数值。

设 $N = 3$, 假设 $SNR = 30$ dB, 随机产生一个行满秩 ($rank(A) = N$) 的信道混合矩阵, 即

$$A = \begin{bmatrix} 0.3922 & 0.7060 & 0.0462 \\ 0.6555 & 0.0318 & 0.0971 \\ 0.1712 & 0.2769 & 0.8235 \end{bmatrix}$$

由于语音信号是一维信号,而 3 种混沌信号分别为二维、三维和四维信号,因此统一选取这 3 种混沌信号中的第 1 路信号与其他 2 路语音信号进行混合。下面分别以二维 Henon 混沌系统、三维

Chen 混沌系统和四维超混沌 Qi 系统为例进行详细的分析。

4.1 Henon 混沌系统

仿真 1 为了进一步验证语音信号是否被成功隐藏在混沌信号中，以 Henon 混沌系统为背景，利用小波变换分析混合信号的时频特性。设采样频率 $f_s = 8\ 000\ \text{Hz}$ 。由第 2 节可知，语音信号频率分布比较广，但其能量、幅值级别都比较低，而 Henon 混沌系统的频率在 $0\sim 4\ 000\ \text{Hz}$ 范围内能量强度主要集中在 $0.8\ \text{J}$ 左右，高于语音信号的能量强度，完全可以把语音信号遮掩起来，同时通过分析混合信号的时频特性，混合信号的时频特性中无法分辨语音信号的时频分布特性，即实现了语音信号的成功隐藏。

仿真 2 接收端采用 FastICA 算法对混合信号进行盲提取。设采样频率 $f_s = 8\ 000\ \text{Hz}$ ，由 Henon 混沌系统产生数据点数 45 001，截取语音信号的点数为 10 000~55 000，图 8 和图 9 分别为提取的 2 路语音信号 SA₁、SA₂ 的波形。由于信道中加性高斯白噪声的影响，与原信号的波形图对比会产生毛刺现象，但是提取前后的信号具有整体上一致性，同时可以得到在 SNR=30 dB 时的相似系数矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} 0.069\ 2 & 0.917\ 8 & 0.004\ 9 \\ 0.924\ 2 & 0.000\ 4 & 0.026\ 6 \\ 0.018\ 6 & 0.006\ 7 & 0.998\ 2 \end{bmatrix}$$

在矩阵 C 中，第 1、第 2、第 3 列分别表示语音 SA₁、SA₂ 和混沌信号；观察矩阵 C 可以看出，第 1 列最大值为 0.924 2，第 2 列为 0.917 8，第 3 列最接近于 1 为 0.998 2，其余的数均接近 0，从而在 Henon 混沌背景下验证了该算法的提取性能。

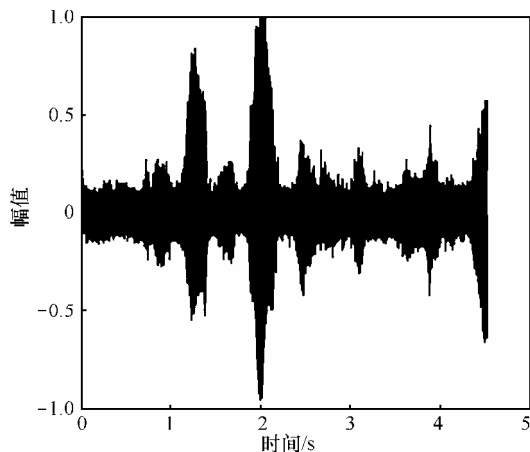


图 8 Henon 背景下提取 SA₁ 语音信号

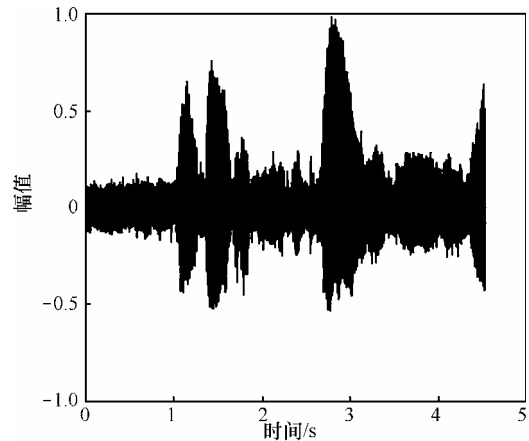


图 9 Henon 背景下提取 SA₂ 语音信号

为了验证噪声环境下的可靠性，本文在不同信噪比条件下分别对 3 种信号的相似系数进行了仿真实验，图 10 为不同信噪比下 3 种信号相似系数的曲线。

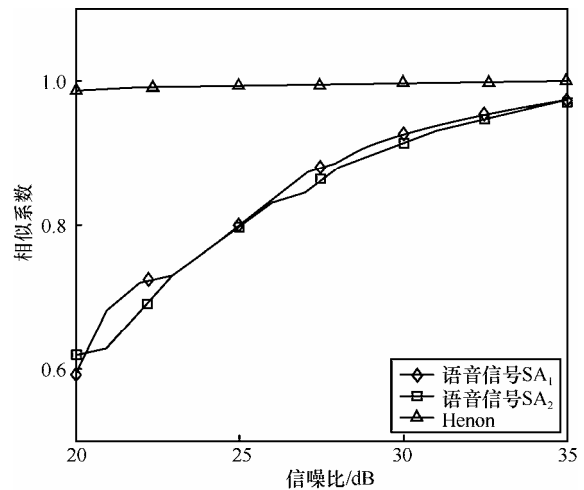


图 10 不同信噪比下 3 种信号的相似系数分析

从图 10 可以看出随着信噪比不断增大，相似系数呈现出增长的趋势。然后利用 MATLAB 中的 wavwrite 函数把语音信号另存为音频文件，由于受到加性高斯白噪声的影响，在播放的过程中虽然有杂音，但可以清楚地还原源语音信号的信息内容。为了证明噪声环境下算法的可靠性，需要对不同信噪比下算法的性能进行分析。表 1 为在不同信噪比下的相似系数，可以看出 2 路语音信号都得到了较好的分离，说明了该算法可以在高斯白噪声的影响下成功地把隐藏在混沌信号中的语音信号分离出来，从而验证了噪声环境下算法的可靠性，为信息的保密隐藏及安全传输开辟了一条新的途径。

**表 1 Henon 混沌背景下信噪比为 29~35 dB 时
3 种信号相似系数**

信噪比/dB	语音 SA ₁	语音 SA ₂	Henon 混沌系统
29	0.910 1	0.897 0	0.997 7
30	0.927 1	0.916 1	0.998 3
31	0.935 8	0.932 1	0.998 4
32	0.948 4	0.944 1	0.998 8
33	0.959 8	0.954 4	0.999 2
34	0.966 3	0.963 6	0.999 1
35	0.973 8	0.970 5	0.999 3

4.2 Chen 混沌系统

由第 2 节的分析可知, Chen 混沌系统的能量强度明显比 Henon 混沌系统高很多, 因此对于能量较高的语音信号, Chen 混沌系统也可以对其起到较好的遮掩效果。重复 4.1 节中的仿真 1 和仿真 2 步骤, 得到 Chen 混沌背景下的仿真结果, 如图 11 和图 12 所示。然后在不同信噪比条件下分别对 3 种信号的相似系数进行了仿真实验, 图 13 为不同信噪比下 3 种信号相似系数的曲线, 表 2 为在不同信噪比下 3 种信号的相似系数, 验证在 Chen 混沌背景下含噪语音信号的成功遮掩和有效分离。

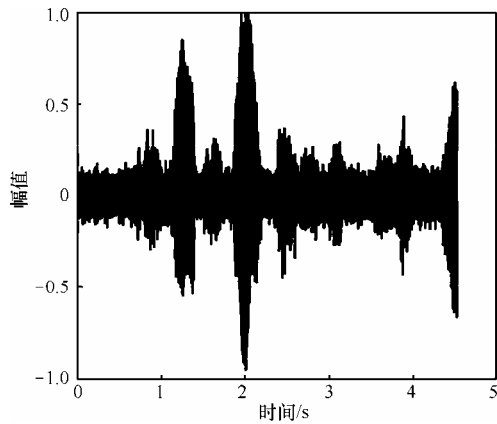


图 11 Chen 背景下提取 SA₁ 语音信号

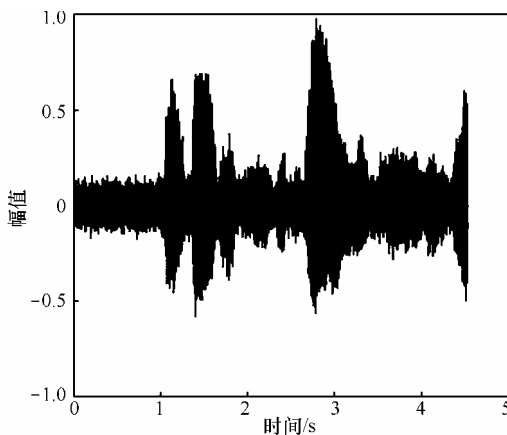


图 12 Chen 背景下提取 SA₂ 语音信号

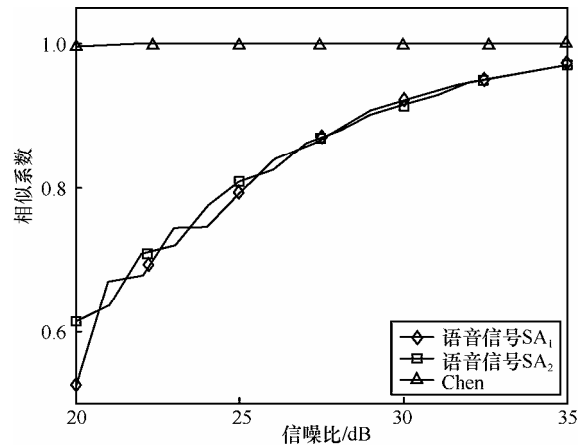


图 13 不同信噪比下 3 种信号的相似系数分析

**表 2 Chen 混沌背景下信噪比为 29~35 dB 时
3 种信号相似系数**

信噪比/dB	语音 SA ₁	语音 SA ₂	Chen 混沌系统
29	0.905 4	0.901 9	0.999 8
30	0.923 4	0.916 8	0.998 3
31	0.935 8	0.931 2	0.998 5
32	0.948 1	0.946 6	0.999 8
33	0.957 3	0.955 0	0.999 9
34	0.963 5	0.964 0	0.998 7
35	0.972 7	0.971 0	0.998 3

4.3 Qi 超混沌系统

由第 2 节中对混沌系统能量聚集带的分析可知, 虽然 Qi 超混沌系统的能量强度没有 Chen 混沌系统的高, Qi 超混沌系统的能量聚集带主要分布在 0~200 Hz, 而语音信号的幅值和频率较低, 因此, Qi 超混沌系统可以实现对语音信号的完全隐藏。并且与 Henon 混沌系统和 Chen 混沌系统相比, Qi 超混沌系统具有 2 个正的指数。该系统与以往系统的最大不同之处在于它的每个方程均含有非线性项, 系统的动态行为更难以预测, 更加难以破译, 在保密通信方面比一般的混沌系统具有更高的使用价值, 受到科研工作者的普遍关注。同样重复 4.1 节中的仿真 1 和仿真 2 步骤, 得到 Qi 超混沌背景下的仿真结果, 如图 14 和图 15 所示。在不同信噪比条件下分别对 3 种信号的相似系数进行了仿真实验, 图 16 为不同信噪比下 3 种信号相似系数的曲线, 表 3 为在不同信噪比下 3 种信号的相似系数, 验证算法的通用性。结合图 11、图 14、表 2、表 3, 可以看出当信噪比大于或等于 30 dB 时, 提取出的信号与原信号的相似度均在 0.9 以上, 信号的时域波形与原信号极为相似, 表明提取算法的性能较好。综上, 该算法实现了在不同的混沌背景下语音

信号的盲分离，从而验证了算法的有效性。

根据文献[13]中算法复杂度的相关知识，通过对算法进行分析，可以计算得到其时间复杂度为 $T(n) = O(n^2)$ 。仿真实验得到了在不同混沌背景下算法运行的总时间，由于混沌系统复杂度的影响，因此在不同混沌背景下算法的运行时间是有差别的，如表 4 所示。

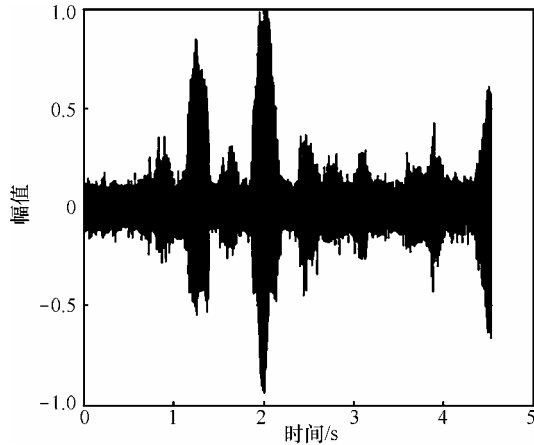


图 14 Qi 背景下提取 SA₁ 语音信号

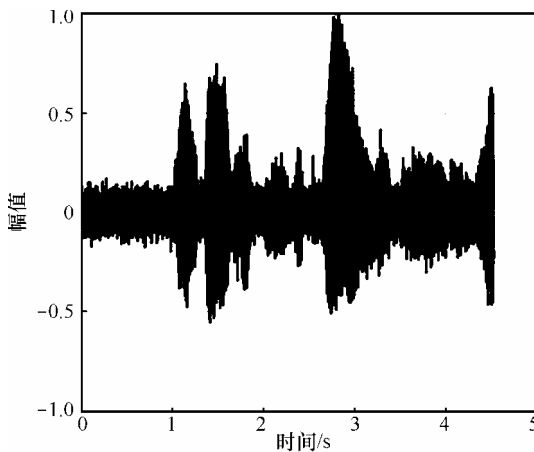


图 15 Qi 背景下提取 SA₂ 语音信号

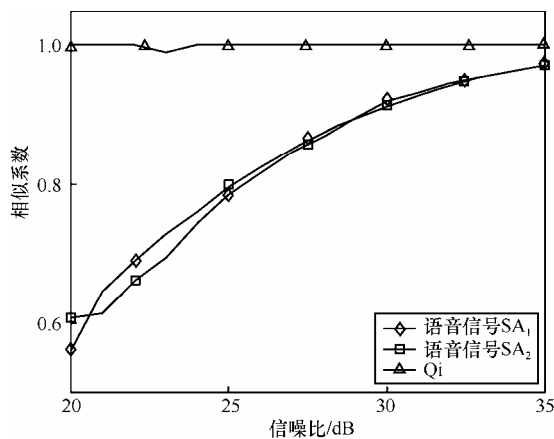


图 16 不同信噪比下 3 种信号的相似系数分析

表 3 Qi 混沌背景下信噪比为 29~35 dB 时 3 种信号相似系数

信噪比/dB	语音 SA ₁	语音 SA ₂	Qi 混沌系统
29	0.894 3	0.893 0	0.998 8
30	0.909 4	0.919 3	0.999 5
31	0.926 6	0.930 2	0.999 6
32	0.938 9	0.943 8	0.999 8
33	0.953 1	0.951 4	0.999 2
34	0.959 4	0.962 0	0.998 1
35	0.969 0	0.969 9	0.999 4

表 4 3 种混沌系统时间复杂度分析

混沌信号	时间/s
Henon	7.422
Chen	8.997
Qi	9.795

5 结束语

混沌保密传输广泛应用于各种信息安全通信领域中，语音信号的混沌遮掩传输是一个至关重要的问题。本文采用小波变换对语音信号和混沌信号的时频特性进行分析，从而实现可靠的隐蔽传输。为验证混沌保密传输的有效性，采用 FastICA 算法实现了含噪信道情况下正定系统混沌能量聚集带内语音信号的盲提取，下一步有望实现欠定系统混沌能量聚集带内语音信号的盲提取，为语音保密通信提供有效分离方法。

参考文献:

- [1] 陈铁明,葛亮. 面向无线传感器网络的混沌加密与消息鉴别算法[J]. 通信学报,2013,05:113-120.
CHEN T M, GE L. Chaos-based encryption and message authentication algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2013, 05: 113-120.
- [2] 王尔馥,王冬青,丁群. 混沌保密通信系统中谐波信号提取的时-频域联合新方法[J]. 通信学报,2011,12:60-64.
WANG E F, WANG D Q, DING Q. New time-frequency method of harmonic signal extraction in chaotic secure communication system [J]. Journal on Communications, 2011,12:60-64.
- [3] 贾红艳,陶倩,陈增强,等. 分数阶 Chen 系统的分析、同步及其保密通信实现[J]. 天津科技大学学报, 2015, 30(6): 66-71.
JIA H Y, TAO Q, CHEN Z Q, et al . The analysis, synchronization and secure communication of fractional order Chen systems[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2015, 30(6): 66-71.
- [4] HAYKIN S, LI X B. Detection of signals in chaos[J]. Proceedings of

the IEEE, 1995, 83(1): 95-122.

- [5] ARAKI S, SAWADA H, MUKAI R. Underdetermined blind sparse source separation for arbitrarily arranged multiple sensors[J]. Signal Process, 2007, 87: 1833-1847.
- [6] VINCENT E. Musical source separation using time-frequency source priors[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2005: 1-8.
- [7] 成谢锋, 徐亮, 严仍义. 混沌混合信号欠定盲分离方法的研究[J]. 南京邮电大学学报, 2011, 30(1): 29-34.
CHEN X F, XU L, YAN R Y. The research of underdetermined blind source separation methods of Chaos of mixed signal[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011, 30(1): 29-34.
- [8] 孟宗, 马钊, 刘东, 等. 基于小波半软阈值消噪的盲源分离方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(3): 45-50.
MENG Z, MA Z, LIU D, et al. Semi-soft threshold de-noising based on wavelet method for blind source separation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 27(3): 45-50.
- [9] LIN Q H, YIN F L, MEI T M, et al. A blind source separation based method speech encryption[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems I: Fundanmental Theory and Applications, 2006,53(6): 1320-1328.
- [10] 贺锋涛, 张敏, 白可, 等. 基于激光散斑和 Henon 映射的图像加密方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 04: 275-279.
HE F T, ZHANG M, BAI K, et al. Image encryption method based on laser speckle and Henon mapping[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016,04:275-279.
- [11] CHEN G R, UETA T. Yet another chaotic attractor[J]. International Journal of Bifurcation & Chaos, 1999, 9(7): 1465-1466.
- [12] QI G Y, DU S Z, CHEN G R, et al. On a four-dimensional chaotic system[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2005, 23(5): 1671-1682.
- [13] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构(C语言版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
YAN W M, WU W M. Data structure(C language version)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.

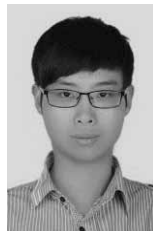
作者简介:



王尔馥(1980-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 黑龙江大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为盲信号分离及盲均衡。



郑远硕(1994-), 女, 海南乐东人, 黑龙江大学硕士生, 主要研究方向为通信信号盲提取及数字化技术。



陈新武(1992-), 男, 福建仙游人, 黑龙江大学硕士生, 主要研究方向为盲均衡及其硬件实现。



刘晓珍(1990-), 女, 山西吕梁人, 黑龙江大学硕士生, 主要研究方向为谐波信号的盲源分离。