一种基于无先导卡尔曼滤波的混沌相移键控通信系统的非相干检测方法

陈宏滨　　冯久超　　胡志辉
(华南理工大学电子与信息学院　广州　510641)

摘　要：基于 UKF 算法，该文提出一种 CSK 通信系统的非相干检测方法。第一个发送符号作为训练符号，接收端根据第一个发送周期内的接收信号，应用 UKF 算法估计载波信号；然后将估计的载波信号和后续接收信号相乘，解调后续发送符号。与相干检测方法相比，这种方法不需要混沌同步。仿真结果表明，与已有的非相干检测方法相比，这种方法具有较好的误码性能，甚至比 FM-DCSK 通信系统的误码性能更好。

关键词：混沌相移键控通信系统；非相干检测；无先导卡尔曼滤波
中图分类号：TN914　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-5896(2008)07-1576-04

A Noncoherent Detection Method for Chaos-Shift-Keying Communication System Based on Unscented Kalman Filter

Chen Hong-bin　　Feng Jiu-chao　　Hu Zhi-hui
(*College of Electronic & Information Engineering*, *South China University of Technology*, *Guangzhou* 510641, *China*)

Abstract: An Unscented Kalman Filter (UKF) based noncoherent detection method for Chaos-Shift-Keying (CSK) communication system is proposed in this paper. The first symbol is used as the training symbol. The carrier signal is estimated from the received signal over the interval of the first symbol duration by using the unscented Kalman filtering algorithm. Then the estimated carrier signal is multiplied with the successive received signal, respectively, to demodulate the successive transmitted symbols. In comparison with the coherent detection method, this algorithm does not require chaos synchronization. In comparison with the existing noncoherent detection methods, simulation results indicate that the method has better BER performance, even outperforms that of the FM-DCSK communication system.

Key words: Chaos-Shift-Keying (CSK) communication system; Noncoherent detection; Unscented Kalman Filter (UKF)

1　引言

混沌同步现象的发现激起了人们对基于混沌的通信的极大研究热情[1]，已提出多种基于混沌的数字通信系统，如混沌相移键控(Chaos Shift Keying，CSK)，差分混沌相移键控(Differential Chaos Shift Keying，DCSK)，调频差分混沌相移键控(Frequency Modulated Differential Chaos Shift Keying, FM-DCSK) [2−4] 等。早期提出的 CSK 通信系统采用基于混沌同步的相干检测方法，它要求接收端和发送端的混沌载波是理想同步的。尽管 CSK 通信系统具有较好的误码性能，但是实际通信环境下混沌同步难以实现，这限制了相干检测方法的实际应用。因此人们转而研究混沌通信系统的非相干检测方法，先后有学者提出 CSK 通信系统的非相干检测方法 [5−7] 以及非相干检测的 DCSK 和 FM-DCSK 通信系统[3, 4, 8, 9]。已经提出的非相干检测方法和相干检测方法相比，尽管不需要混沌同步，但是它们的误码性能明显不如相干检测方法。

2006-12-25 收到，2007-06-28 改回
国家自然科学基金(60572025)、教育部基金(NCET-04-0813，105137)、广东省自然科学基金(04205783，07006496)和华南理工大学博士学位论文创新基金资助课题

近年来，无先导卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filtering，UKF)算法已提出并应用于混沌信号的滤波[10, 11]，与扩展卡尔曼滤波算法(Extended Kalman Filtering，EKF)相比，由于它不像 EKF 那样用一阶泰勒展式来近似非线性状态空间模型，而是直接利用非线性模型并能估计到泰勒展式的至少二阶项，因而具有更高的估计精度。为此，本文提出和实现一种基于 UKF 的 CSK 通信系统的非相干检测方法。

2　CSK 通信系统

考虑一个单载波、对称的 CSK 通信系统(非对称的 CSK 通信系统与此类似)[12]，如图 1 所示，其中 $d^{(l)}$ 是第 l 个发送符号(假设它们等概地取值“+1”和“−1”)。混沌信号发生器产生的混沌序列记为 x_k，作为载波。假设扩频因子为 β，在时刻 $k=(l-1)\beta+1,\cdots,l\beta$，发送信号可表示为

$$s_k = d^{(l)} x_k \tag{1}$$

发送信号经过信道传输，受到加性高斯白噪声(AWGN)的干扰，在时刻 k 的接收信号为

$$r_k = s_k + \xi_k \tag{2}$$

其中 ξ_k 是均值为 0，方差为 $N_0/2$ 的 AWGN。根据接收到的信号，接收端用相干或非相干检测的方法解调发送符号。在

图 1 所示的对称 CSK 通信系统中，假如混沌同步可以实现，接收端复制发送端的混沌载波，用相干检测方法得到第 l 个发送符号的估计为

$$\hat{d}^{(l)}=\mathrm{sgn}\left(\sum_{k=(l-1)\beta+1}^{l\beta} r_k x_k\right) \tag{3}$$

其中 $\mathrm{sgn}(\cdot)$ 是符号函数。当用立方映射作为混沌映射并应用相干检测法时，对称 CSK 通信系统在 AWGN 环境下的理论误码率[12]近似为

$$\mathrm{BER}_s=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\left[\frac{1}{\beta}+\frac{N_0}{E_b}\right]^{-1/2}\right) \tag{4}$$

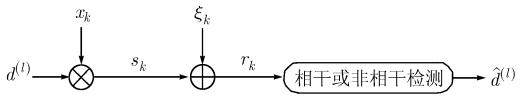


图 1 对称 CSK 通信系统框图

3 基于 UKF 的非相干检测方法

UKF 算法是一种用于非线性系统状态变量估计的自适应滤波算法，它的基本思路是将待估计的状态变量近似看作高斯随机变量，首先用一系列 sigma 点代表状态变量的先验均值和先验协方差矩阵，然后将非线性系统方程作用于 sigma 点，计算经无先导变换(Unscented Transform，UT)后状态变量的均值和协方差矩阵的估计值，最后对状态变量的协方差矩阵纠错并得到状态变量的估计值[10, 11]。

下面以对称 CSK 通信系统为例，介绍用 UKF 算法估计载波信号并解调发送符号的非相干检测方法。在图 1 所示的对称 CSK 通信系统中，假设第一个发送符号为“+1”(作为训练符号)，接收端根据第一个发送周期内的接收信号，用 UKF 算法估计载波信号，然后将估计的载波信号和后续接收信号相乘，解调后续发送符号。设得到的载波信号的估计为 $\hat{x}_k$，那么第 l 个发送符号的估计为

$$\hat{d}^{(l)}=\mathrm{sgn}\left(\sum_{k=(l-1)\beta+1}^{l\beta} r_k \hat{x}_k\right) \tag{5}$$

假设接收端已知产生载波的混沌映射方程，即 $x_k=f(x_{k-1})$，其中 f 代表混沌映射。由式(1)和式(2)得到第一个发送周期内的接收信号为 $r_{1,k}=d^{(1)}x_k+\xi_{1,k}$，它们分别构成状态空间模型和观测模型：

$$x_k=f(x_{k-1}) \tag{6}$$

$$r_{1,k}=x_k+\xi_{1,k} \tag{7}$$

根据这两个模型，我们应用 UKF 算法[13]处理这一状态空间估计问题如下：

$$\boldsymbol{\chi}_{k-1}^{(0)}=\hat{\bar{\boldsymbol{x}}}_{k-1} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{\chi}_{k-1}^{(j)}=\hat{\bar{\boldsymbol{x}}}_{k-1}+\left(c\sqrt{\widehat{\boldsymbol{P}}_{k-1}}\right)_j,\quad j=1 \tag{9}$$

$$\boldsymbol{\chi}_{k-1}^{(j)}=\hat{\bar{\boldsymbol{x}}}_{k-1}-\left(c\sqrt{\widehat{\boldsymbol{P}}_{k-1}}\right)_{j-1},\quad j=2 \tag{10}$$

$$\boldsymbol{\chi}_{k|k-1}^{(j)}=f\left(\boldsymbol{\chi}_{k-1}^{(j)}\right),\qquad j=0,1,2 \tag{11}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}=\sum_{j=0}^{2}W^{(j)}\boldsymbol{\chi}_{k|k-1}^{(j)} \tag{12}$$

$$\widehat{\boldsymbol{P}}_{k|k-1}=\sum_{j=0}^{2}W^{(j)}\left(\boldsymbol{\chi}_{k|k-1}^{(j)}-\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}\right)\left(\boldsymbol{\chi}_{k|k-1}^{(j)}-\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}\right)^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

$$\hat{r}_{1,k}=\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} \tag{14}$$

$$\widehat{\boldsymbol{P}}_{rr}=\widehat{\boldsymbol{P}}_{k|k-1}+\widehat{\boldsymbol{Q}}_k \tag{15}$$

$$\widehat{\boldsymbol{P}}_{xr}=\widehat{\boldsymbol{P}}_{k|k-1} \tag{16}$$

$$K=\widehat{\boldsymbol{P}}_{xr}\widehat{\boldsymbol{P}}_{rr}^{-1} \tag{17}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k=\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}+K\left(r_{1,k}-\hat{r}_{1,k}\right) \tag{18}$$

$$\widehat{\boldsymbol{P}}_k=\widehat{\boldsymbol{P}}_{k|k-1}-K\widehat{\boldsymbol{P}}_{xr}^{\mathrm{T}} \tag{19}$$

其中 $\hat{\bar{\boldsymbol{x}}}_k$ 和 $\widehat{\boldsymbol{P}}_k$ 分别是在时刻 k 状态变量的均值和协方差矩阵的估计值，$\widehat{\boldsymbol{P}}_{k|k-1}$ 是在时刻 k 状态变量的协方差矩阵的预测值，$\hat{r}_{1,k}$ 是在时刻 k 观测变量的估计值，$\widehat{\boldsymbol{Q}}_k$ 是 ξ 的协方差矩阵在时刻 k 的估计值，$\widehat{\boldsymbol{P}}_{rr}$ 是观测变量的协方差矩阵的估计值，$\widehat{\boldsymbol{P}}_{xr}$ 是状态变量和观测变量的互协方差矩阵的估计值，K 是 Kalman 增益，$W^{(j)}$ 是权值，满足：$W^{(0)}=1-1/c^2$, $W^{(j)}=1/(2c^2)$, $j=1,\ 2$，其中 c 是一个小的正数。

下面简要分析本文方法在 AWGN 环境下的理论误码性能。由式(1)，式(2)和式(5)得到

$$\hat{d}^{(l)}=\mathrm{sgn}\left(\sum_{k=(l-1)\beta+1}^{l\beta}\left(d^{(l)}x_k+\xi_k\right)\hat{x}_k\right) \tag{20}$$

令 $T=\sum_{k=(l-1)\beta+1}^{l\beta}\left(d^{(l)}x_k+\xi_k\right)\hat{x}_k$，那么当 $d^{(l)}=+1$ 时，T 的均值和方差分别为 $E\left(T\middle|d^l=+1\right)=E\left(\sum_{k=(l-1)\beta+1}^{l\beta}x_k\hat{x}_k\right)$ 和 $\mathrm{var}\left(T\middle|d^l=+1\right)=\mathrm{var}\left(\sum_{k=(l-1)\beta+1}^{l\beta}x_k\hat{x}_k\right)+\frac{\beta N_0}{2}\mathrm{var}(\hat{x}_k)$。又有 $E\left(T\middle|d^{(l)}=-1\right)=-E\left(T\middle|d^{(l)}=+1\right)$，$\mathrm{var}\left(T\middle|d^{(l)}=-1\right)=\mathrm{var}\left(T\middle|d^{(l)}=+1\right)$。因此，本文方法的理论误码率近似为

$$\mathrm{BER}_t=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\frac{E\left(T\middle|d^l=+1\right)}{\sqrt{2\,\mathrm{var}\left(T\middle|d^l=+1\right)}}\right) \tag{21}$$

由以上分析可知，本文方法的理论误码率和两个因素有关：(1)载波信号估计和载波信号的矢量积的均值和方差；(2)载波信号估计的方差。下面以仿真实验展示本文方法的误码性能。

4 仿真结果

本文以对称 CSK 通信系统为例，在 MATLAB 环境下进行仿真。用立方映射产生混沌信号，它的动力学方程是：

$$x_{k+1}=4x_k^3-3x_k,\ \ x_k\in(-1,\ 1) \tag{22}$$

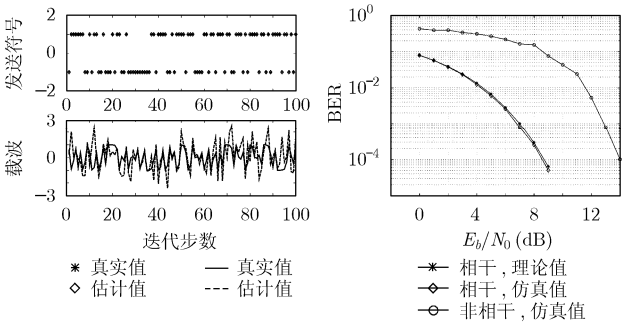
选择合适的初值进行迭代，产生混沌信号作为载波[12]。发送 10000 个信息比特符号，独立运行 20 次后结果取平均。我们将状态变量的均值和协方差矩阵分别取为一个服从标准正态分布的随机数和 10^{-5}，$c=0.1$。$\widehat{\boldsymbol{Q}}$ 根据信噪比对应计算。

先对解调波形进行示例仿真。当 $\beta=100$， $E_b/N_0=14\text{dB}$ 时，前 100 个发送符号、载波信号及其估计值如图 2(a)所示。从图 2(a)可以看出，在低信噪比时，尽管载波信号的估计偏差较大，但仍然能较为正确地估计发送符号。当扩频因子 $\beta=100$ 时，本文的方法及与之对比的相干检测方法的 BER 随 E_b/N_0 变化的曲线如图 2(b)所示。从图 2(b)可以看出，本文方法的误码性能不及相干检测方法的误码性能(但相干检测方法，在实际通信环境中是不可能实现的)。当扩频因子 β 分别取 50，80，100 和 200 时，我们得到 BER 随 E_b/N_0 的变化曲线如图 3(a)所示。从图 3(a)可以看出，随着扩频因子的增大，噪声功率增大，估计精度并没有提高，误码性能反而有所下降。

进一步将本文方法和已有非相干检测方法作误码性能对比。在 AWGN 环境下，当用立方映射作为混沌映射时，DCSK 通信系统的理论误码率[12]近似为

$$\text{BER}_d=\frac{1}{2}\text{erfc}\left(\left[\frac{2}{\beta}+\frac{4N_0}{E_b}+\frac{\beta N_0^2}{E_b^2}\right]^{-1/2}\right) \tag{23}$$

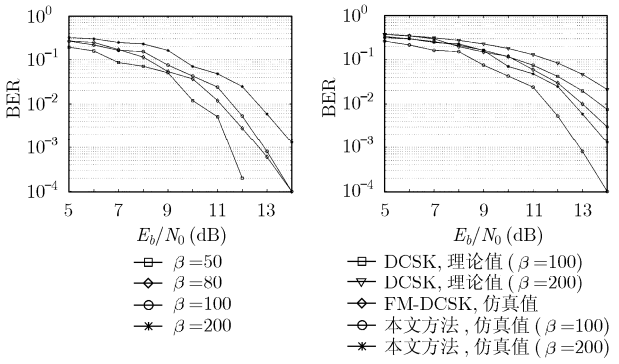
当扩频因子 β 分别取 100 和 200 时，本文方法和 DCSK 通信系统的 BER 随 E_b/N_0 变化的曲线如图 3(b)所示。可以看出，本文方法的误码性能优于 DCSK 通信系统的误码性能。此外，FM-DCSK 通信系统的最优误码性能[9]如图 3(b)所示，对比可以发现，本文方法的误码性能甚至优于 FM-DCSK 通信系统的误码性能。文献[5–7]中的方法的误码性能均不及 DCSK 通信系统的误码性能，与这些方法相比，本文方法也具有较好的误码性能。



(a) 本文方法的发送符号、载波信号及其估计值对比 ($\beta=100, E_b/N_0=14\text{dB}$)

(b) 本文方法和相干检测方法的误码性能对比 ($\beta=100$)

图 2



(a) 本文方法在不同扩频因子时的误码性能对比

(b) 本文方法和 DCSK、FM-DCSK 通信系统的误码性能对比

图 3

5 结束语

利用 UKF 算法对状态空间模型的估计，本文已提出和实现了一种基于 UKF 算法的 CSK 通信系统的非相干检测方法，并导出了系统的误码率的理论值。仿真结果表明，与已有的非相干检测方法相比，这种方法具有较好的误码性能，它甚至比 FM-DCSK 通信系统有更好的误码性能。

参 考 文 献

[1] Pecora L M and Caroll T L. Synchronization in chaotic systems. *Physics Review Letters*, 1990, 64(8): 821–824.

[2] Dedieu H, Kennedy M P, and Hasler M. Chaos shift keying: Modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua's circuits. *IEEE Trans. on Circuits and Systems-part* II, 1993, 40(10): 634–642.

[3] Kolumban G, Vizvari G K, and Schwarz W, *et al.*. Differential chaos shift keying: A robust coding for chaos communication. in Proceedings of International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, Seville, Spain, June 27-28, 1996: 87–92.

[4] Kolumban G, Kis G, and Jako Z, *et al.*. FM-DCSK: A robust modulation scheme for chaotic communications. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 1998, E81-A(9): 1798–1802.

[5] Kisel A, Dedieu H, and Schimming T. Maximum likelihood approaches for noncoherent communications with chaotic carriers. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-part* I, 2001, 48(5): 533–542.

[6] Feng J C and Tse C K. On-line adaptive chaotic demodulator based on radial-basis-function neural networks. *Physical Review E*, 2001, 63(2): 1–10.

[7] Tse C K, Lau F C M, and Cheong K Y, *et al.*. Return-map-based approaches for noncoherent detection in chaotic digital communications. *IEEE Trans. on Circuits and Systems-part* I, 2002, 49(10): 1495–1499.

[8] Zhu Z W and Leung H. Combined demodulation with adaptive blind equalization for chaotic modulation communication systems. *IEEE Trans. on Circuits and Systems-part* I, 2002, 49(12): 1811–1820.

[9] Kolumban G, Kis G, and Lau F C M, *et al.*. Optimal noncoherent FM-DCSK detector: Application of chaotic GML decision rule. in IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Vancouver, Canada, May 23-26, 2004, IV: 597–600.

[10] Julier S J and Uhlmann J K. Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proc. of the IEEE*, 2004, 92(3): 401–422.

[11] 王世元, 冯久超. 一种对噪声混沌信号的滤波方法. 电路与系统学报, 2004, 9(4): 58–62.
Wang S Y and Feng J C. A noise reduction method for noisy chaotic signal. *Journal of Circuits and Systems*, 2004, 9(4): 58–62.

[12] Lau F C M and Tse C K. Chaos-Based Digital Communication Systems, Heidelberg: Springer Verlag, 2003: 41–96.

[13] Xiong K, Zhang H Y, and Chan C W. Performance evaluation of UKF-based nonlinear filtering. *Automatica*, 2006, 42(2): 261–270.

陈宏滨：　男，1981 年生，博士生，研究方向为混沌信号与信息处理.

冯久超：　男，1964 年生，博士，广东省高校特聘教授(“珠江学者”)，博士生导师，研究领域为数字信号处理、数字通信、非线性动力学及混沌理论与应用.

胡志辉：　男，1984 年生，硕士生，研究方向为混沌信号与信息处理.