

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.06.007

混沌遥测及其非合作信号检测与参数估计^{*}

魏恒东^{**}

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:从混沌伪码序列的产生机理出发,分别从量化混沌遥测信号检测、实值混沌遥测信号识别和混沌遥测系统参数估计方面分析了可供非合作者利用的特征和方法。提出了基于 Duffing 振子的混沌遥测信号检测方法,以及基于相空间重构的遥测信号识别方法和基于混沌同步的遥测系统参数估计方法。仿真分析表明所构造方法可以实现对混沌遥测信号的非合作分析。

关键词:混沌遥测;信号检测;参数估计;非合作分析

中图分类号:TN911.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)06-0711-05

Chaotic Telemetry and its Non-cooperative Signal Detection and Parameters Estimation

WEI Heng-dong

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract:Starting from the generation mechanism of chaotic pseudo code sequence, this paper analyzes the characteristic and method that can be used by on-cooperator from the detecting of quantified chaotic telemetry signal, identification of real number chaotic telemetry signal and parameter estimation of chaotic telemetry system, respectively. The methods about chaotic telemetry signal detection based on Duffing oscillator, chaotic telemetry signal identification based on phase-space reconstruction and chaotic telemetry parameter estimation based on chaos synchronization are proposed respectively. Simulation analysis shows that the proposed methods can be used by non-cooperator to analyze the chaotic telemetry signal.

Key words:chaotic telemetry; signal detection; parameter estimation; non-cooperative analysis

1 引 言

遥测是测控系统的重要组成部分,对无人机、导弹、卫星的发射和运行有着举足轻重的作用。遥测信号中携带大量有用信息,包含目标的工作状态、工作参数,以及目标上设备获取的各类信息。通过对遥测信号的截获分析,可以获取目标的技术体制、作战性能、技战术指标、活动态势、目标特性等。混沌遥测利用混沌伪码序列代替传统的伪码序列完成遥测系统相关参数的传输与测量^[1]。与传统伪码扩谱遥测相比,混沌遥测具有更强的安全性与保密性,尤其是混沌扩谱序列改善了传统扩谱序列的周期性和

数量有限性的缺点^[2],得到了广大研究人员的青睐。

1990 年,美国海军实验室的 Pecora 和 Carroll 实现了两个混沌系统之间的同步^[3],使得混沌应用到信息传输成为可能。混沌遥测具有低截获、抗干扰、多址接入和隐蔽测控等特点。非合作者即使知道遥测体制及帧结构也无法利用传统信号分析方法提取其携带的有用信息。然而,从混沌序列产生机理出发,其仍有非合作方可利用的固有特征。目前,公开文献对非合作混沌遥测信号的分析涉及较少,作为非合作遥测信号分析,首要问题是对混沌遥测信号的检测,其次是完成对混沌遥测信号的识别,以便利用相关技术对混沌遥测的参数进行估计,进而提取有用信息。本文首先介绍混沌遥测的基本原理,并

^{*} 收稿日期:2013-03-19;修回日期:2013-06-02 Received date:2013-03-19;Revised date:2013-06-02

^{**} 通讯作者:hdwei@foxmail.com Corresponding author:hdwei@foxmail.com

分析其可为非合作者利用的固有特征;其次,分别从量化混沌遥测信号检测、实值混沌遥测信号识别和混沌参数估计 3 个方面对混沌遥测信号的非合作分析进行研究,为相关实际应用提供有益的参考。

2 混沌遥测基本原理

混沌遥测的基本原理是将待传输的数据利用高速的混沌序列调制,实现频谱扩展后再传输,接收端利用同步电路产生相同混沌序列进行相关处理,以恢复遥测数据并实现相关遥测参数的获取,其原理框图如图 1 所示。

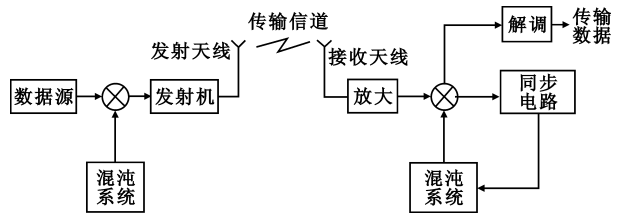


图 1 混沌遥测原理框图
Fig.1 Block diagram of chaotic telemetry system

整个混沌遥测系统能否可靠有效地工作,在很大程度上依赖于系统的同步能力。实际应用中,根据采用混沌遥测方式的不同而采用不同的同步方式。

根据系统采用混沌序列的方式将混沌遥测分为实值混沌遥测和量化混沌遥测。实值混沌遥测直接利用混沌系统产生的实值混沌序列与需要传输的信息进行调制,产生适合传输的模拟信号;量化混沌遥测将混沌系统的实值混沌序列变换成与传统伪码序列类似的二值序列,并与需要传输的信息进行作用,产生适合传输的数字信号。

2.1 实值混沌遥测

实值混沌遥测直接利用混沌系统产生混沌序列完成混沌遥测,这种方式最大限度的保持了混沌系统的优良特性,常用的实值混沌遥测有混沌扩谱^[4]和混沌调制^[5]。

实值混沌扩频是将需要传输的有用信息利用实值混沌序列进行扩谱后进行传输,接收端利用相同的混沌序列恢复传输信息。

下面以单通道实值混沌遥测为例简要介绍需要传输的信息为数字信号时的混沌遥测。假设收发双方有相同的混沌序列 $\{x_n\}$, 需要传输的信息序列为 $\{b_k\}$, $b_k \in \{-1, 1\}$ 。每一个信息码与一个长度为 N 的混沌序列码相乘得到需要传输的信号

$$s_n = b_k x_n, n = 1 + (k - 1)N, \cdots, kN, k = 1, 2, \cdots \quad (1)$$

接收机收到被噪声污染的信号 $r_n = s_n + e_n$ 。利用与发送方相同的混沌序列码,在每一个符号内进

行信息码解扩,即计算接收的信号与混沌序列码的相关函数 $C = \langle r_n, x_n \rangle_{\text{symbol}}$ 。根据相关函数的输出,设定判决门限就可以恢复出原始的传递信息。图 2 给出了单通道实值混沌遥测的仿真分析。

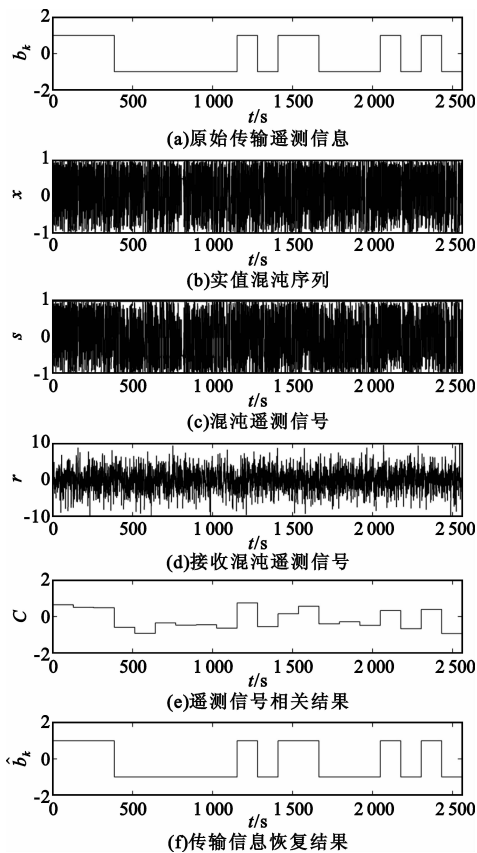


图 2 实值混沌遥测信号的扩频与解扩
Fig.2 The spread spectrum and de-spread spectrum of real number chaotic telemetry signal

另一种实值混沌遥测方式是混沌调制,即利用传输的信息去调制混沌系统的某个参数,利用该参数去驱动混沌系统产生含有信息的混沌载波。接收方利用混沌同步电路进行同步,进而提取有用信息。典型的混沌调制方式是混沌键控(Chaos Shift Key, CSK),该方式将需要传输的信息序列映射成不同的混沌吸引子。如果接收端能同步地复制出混沌信号,那么就可以通过分析同步误差来恢复信号。我们将在下一节的混沌参数估计中分析这种混沌调制方式信号分析方法。

上述实值混沌遥测方式中,收发双方的同步是完成信息解调的先决条件。对于实值混沌遥测系统的同步,收发双方可以采用统一的时钟来控制混沌系统的演化,完成两个混沌系统的同步。然而,由于混沌系统对初始状态的敏感依赖性,导致这种方式的具体实施困难较大。利用同步信道来传输同步信息完成两个系统的同步是实际应用中常用的方式之

一。随着混沌系统自同步技术的发展,自同步方式也可用作两个混沌系统之间的同步。自同步可以在混沌系统参数未知的情况下完成两个系统的同步,更具实际应用意义。

2.2 量化混沌遥测

实值混沌遥测尽管在很大程度上保留了混沌系统的固有非周期特性,但是由于混沌系统的初值依赖性,在应用中较难实现。因此,在应用中常将连续混沌系统数字化后得到二值序列。与实值混沌遥测相比,量化混沌遥测可以方便地利用传统伪码扩谱遥测系统的成熟技术,实现难度和风险小。

量化混沌遥测将实值的混沌序列转化为二值或多值的扩谱序列。二值量化利用混沌系统 $x_{n+1} = f(x_n)$ 产生实值混沌序列 $\{x_n\}_{n=1}^N$, 假设 $x_n \in [0, 1]$, 然后按照下式进行二值量化处理:

$$y_n = \begin{cases} 0, & x_n \leq c \\ 1, & x_n > c \end{cases} \tag{2}$$

其中, c 为阈值,一般取为 0.5, 由此得到的序列 $\{y_n\}_{n=1}^N$ 即为二进制的数字混沌序列。

二值量化序列虽然是二进制序列,但每得到一个序列元素都对应着一次迭代,运算量相当大,大大影响了生成序列的速度。另外,二值量化严重破坏了序列的混沌特性,大大减弱了序列的优良特性。与二值量化相比,多值量化在一定程度上扩展了序列的周期,更加适合于扩谱操作,其产生原理是利用混沌系统

$x_{n+1} = f(x_n), n = 1, 2, \cdots N, x_n \in [a, b]$ \tag{3}

产生实数值混沌序列 $\{x_n\}_{n=1}^N$ 。将混沌序列的取值区间 $[a, b]$ 均匀划分为 M 份,通常选取 $M = 2^k$, 其中 k 为一个正整数,即划分间隔 $\Delta = (b - a)/M$, 那么可以将实数值的混沌序列转化为取值在 1 到 M 之间的整数序列,即

$$y_n = \begin{cases} 1, & x_n \in [a, a + \Delta] \\ 2, & x_n \in (a + \Delta, a + 2\Delta] \\ \vdots & \vdots \\ M, & x_n \in (a + (M - 1)\Delta, b] \end{cases} \tag{4}$$

然后将 $\{y_n\}_{n=1}^N$ 中的每一个元素转换为 k 位二进制数,首尾相接得到二进制序列串,即二值扩谱序列码。在实际应用中还可以将量化后的序列截断得到周期伪码序列。

量化混沌遥测利用量化混沌序列代替传统的伪码序列得到高性能的混沌遥测系统,其原理与常规伪码遥测类似,详细的介绍可参见文献[6-7]。

量化混沌遥测系统的同步方式类似于传统伪码遥测系统的同步方式,如果将混沌序列截断、量化,并取有限长度,则可以利用传统伪码同步技术实现

混沌序列的同步,如采用滑动相关法、延迟锁相环、并行捕获等方法。

3 混沌遥测信号非合作分析

3.1 量化混沌遥测信号检测

混沌遥测信号检测是进行信号分析的前提条件。混沌检测的主要机理是:混沌系统对噪声不敏感而对周期信号十分敏感,外加的周期信号可以使得系统的相态发生明显改变,从而判断信号有无^[2]。常用的混沌检测振子是 Duffing 振子,如下式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \omega x_2 \\ \dot{x}_2 = \omega(-kx_2 + x_1 - x_1^3 + \gamma \cos(\omega t)) \end{cases} \tag{5}$$

其中, $\gamma \cos(\omega t)$ 为周期策动力, γ 为周期策动力幅值, k 为阻尼比, $x - x^3$ 为非线性回复力, ω 为策动力角频率。

考虑到量化混沌遥测信号与传统的伪码扩谱信号具有相同的信号形式,它们都利用一定频率的载波信号进行信息传输。因此,可以利用外加的量化混沌遥测信号使得 Duffing 系统策动力幅值发生改变,使得处在混沌临界状态的 Duffing 系统发生跃变而进入大周期状态,从而完成检测。结合前期我们的研究成果^[8],采用基于哈密顿量的定量检测方法可以实现量化混沌遥测信号的检测。关于哈密顿量的定义及检测器构造详见文献[8]。图 3 是利用 Duffing 系统对混沌遥测信号的检测仿真结果,其中 $k = 0.5, \gamma_p = 0.826, A = 0.000\ 1, \omega = 10\ \text{rad/s}$, 待检信号 $s(t) = A \cos(\omega t)$ 为一个符号长度的信号,所加噪声为零均值高斯白噪声 $n(t)$ 。图 3 给出了利用平均伪哈密顿量进行信号检测 1 000 次实验平均的结果。由图可知,可以利用 Duffing 振子对量化混沌遥测信号进行有效检测。

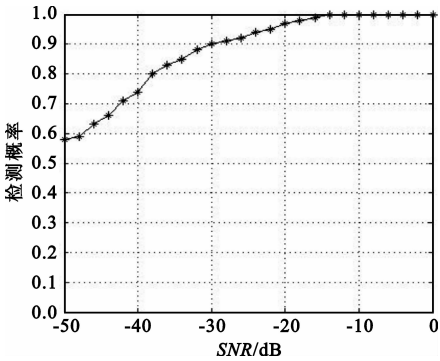


图 3 量化混沌遥测信号检测结果
Fig.3 The detection result of quantized chaotic telemetry signal

3.2 实值混沌遥测信号识别

量化混沌遥测在一定程度上破坏了系统的优良

特性,因此实值混沌遥测也具有广阔应用前景。识别实值混沌遥测序列其是否是混沌的,对后续建模与分析尤为重要。然而,由于实值混沌遥测信号具有很低的功率谱,而且具有类噪声特性,普通的信号分析方法无法进行有效识别。另外,信号往往掩盖在噪声中。因此,对实值混沌遥测信号的检测就是从噪声中识别具有混沌特性的序列,即区别混沌与噪声,判断混沌信号是否存在。在实际的应用中还要考虑传输信息对识别性能的影响。

2010年,我们研究了随着相空间重构维数增加,相空间中两个距离很近的点的变化趋势,并提出了在较小数据量下快速区别混沌与噪声的方法^[9],并应用到了实值混沌直扩信号的识别^[10]。

对于观测到的实值混沌遥测扩谱信号,利用相空间重构理论^[11],进行相空间重构。对于相空间中的每一个相点,我们取它与其 ϵ 闭邻域内的所有点之间距离的算术平均来描述该点的变化特性,这个距离的算术平均表示为

$$r(i, d) = \frac{1}{|U(i, \epsilon)|} \sum_{y(k, d) \in U(i, \epsilon)} \|y(i, d) - y(k, d)\|, \quad i = 1, 2, \dots, N - (d - 1)\tau \tag{6}$$

其中, $U(i, \epsilon)$ 是相点 $y(i, d)$ 以 ϵ 为半径的闭邻域; $y(k, d)$ 是与 $y(i, d)$ 的距离小于等于 ϵ 的两个相点; $|U(i, \epsilon)|$ 是该 ϵ 闭邻域内所有相点的个数; $y(i, d) = (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(d-1)\tau})$ 。

定义

$$\Omega(d) = \frac{r(d+1)}{r(d)} \tag{7}$$

其中:

$$r(d) = \frac{1}{N - (d - 1)\tau} \sum_{i=1}^{N - (d - 1)\tau} r(i, d) \tag{8}$$

来描述相空间中距离很近的这些点集构成的整个相空间的变化情况。图 4 是利用相空间中相点之间距离的变化情况来描述混沌遥测信号与完全随机信号之间的区别。从图中可以看出,混沌遥测和随机噪声之间有明显区别,可以进行有效识别。

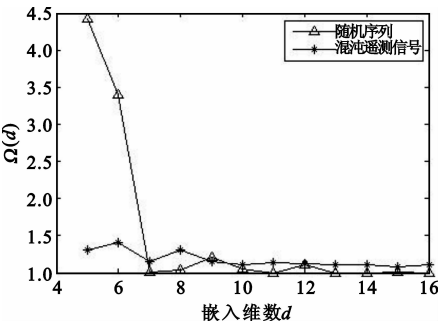


图 4 实值混沌遥测信号识别结果

Fig.4 Identification result of real number chaotic telemetry signal

3.3 混沌遥测系统参数估计

混沌遥测常常利用混沌系统的参数来携带有用信息,也可以理解为将携带的信息映射到不同的混沌吸引子。在某些情况下,我们知道混沌遥测系统的动力学模型而不知道其所映射的参数值。另外,我们能够得到关于系统的一些观测数据,如果能够根据这些观测数据对这些参数进行准确估计便可以提取其所携带的有用信息,进而对观测目标的技术体制、作战性能、技战术指标、目标特性进行分析。

利用混沌同步进行系统参数估计近年来得到了广泛的研究^[12],它利用关于系统未知参数构造的动力学方程进行参数估计。常见的混沌同步方式有完全同步、相位同步、滞后同步、广义同步等,下面以基于完全同步的参数估计方法来介绍对携带遥测信息的未知系统参数估计。

考虑含有未知参数的 Lorenz 系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \sigma(x_2 - x_1) \\ \dot{x}_2 = px_1 - x_2 - x_1x_3 \\ \dot{x}_3 = x_1x_2 - bx_3 \end{cases} \tag{9}$$

其中, $\sigma = 10$ 、 $b = 8/3$ 是已知参数,而 p 为待估计的携带遥测信息的参数。假设所能观测到的信号为 $s = h(\mathbf{x}) = x_2$, 系统的动力学结构已知,因此可构造驱动系统:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \sigma(s - y) \\ \dot{y}_2 = qy_1 - y_2 - y_1y_3 \\ \dot{y}_3 = y_1y_2 - by_3 \end{cases} \tag{10}$$

其中, q 是对未知参数 p 的估计。设计参数更新规则:

$$\dot{q} = (x_2 - y_2)y_1 \tag{11}$$

为了完成系统参数估计就要在当 $p = q$ 时两个系统发生完全同步。即 $(y, q) = (x, p)$ 是系统的渐近稳定解。根据 Lyapunov 理论和 LaSalle 不变集原理容易验证该系统零解的渐近稳定性^[13-14],即随着时间推移, $q \rightarrow p$ 的真实值。

图 5 是利用混沌遥测信号参数估计提取传输信息的仿真分析,其中需要传输的遥测信息序列为 $\{b_k\}$, $b_k \in \{-1, 1\}$, 根据符号不同,分别映射为 $p = 28$ 和 $p = 25$ 。参数估计以后利用判决门限估计传输的原始遥测信息。

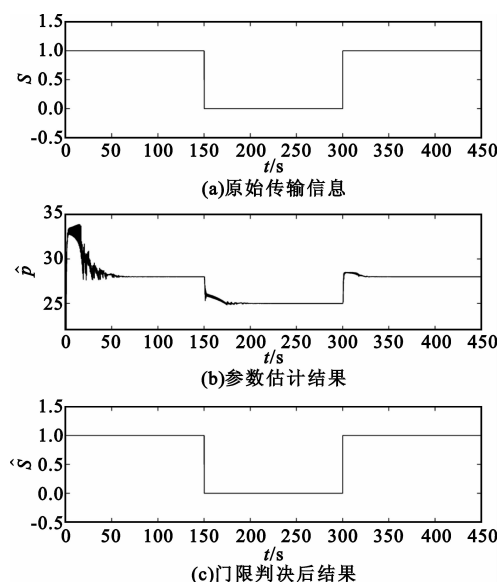


图 5 混沌遥测系统参数估计

Fig.5 Parameter estimation of chaotic telemetry system

4 结 论

混沌遥测是遥测技术中的一项新兴技术,它的引入增强了遥测系统的安全性及保密性,非合作者即使知道遥测信号的帧格式也无法利用普通方法提取其所携带的有用信息。本文通过对混沌遥测的机理分析,分别从量化混沌遥测信号检测、实值混沌遥测信号识别和混沌遥测参数估计方面分析了可供非合作者利用的特征和方法。分析表明,尽管混沌遥测具有比常规扩频更好的特性,但混沌信号产生的机理决定了其仍有可以被利用的特征,通过适当构造分析方法可以实现对其进行信号截获与分析。

尽管本文给出了可供非合作者分析的混沌遥测信号特征和方法,但是对于实值混沌遥测信号的识别和参数估计都只考虑了弱噪声的影响。因此,构造在强噪声或者中度噪声污染下的混沌遥测信号识别的参数估计具有更好的工程价值。考虑到噪声对所提算法的影响,在进行建模前先进行滤波操作也许会使得所提方法更具实际应用价值,因此,下一步我们将研究滤波操作对所构造方法的影响。

参考文献:

- [1] 刘嘉兴. 飞行器测控与信息传输技术[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
LIU Jia-xin. Spacecraft TT&C and Information Transmission Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 魏恒东. 混沌直扩信号检测与混沌同步研究[D]. 成都:电子科技大学,2010.
WEI Heng-dong. A study on the detection of chaotic direct

sequence spread spectrum signal and chaos synchronization [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)

- [3] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems [J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821 – 824.
- [4] Parlitz U, Ergezer S. Robust communication based on chaotic spreading sequences [J]. Physics Letters A, 1994, 188(2): 146 – 150.
- [5] Stavroulakis P. Chaos applications in telecommunications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [6] 刘嘉兴, 何世彪. 混沌测控的概念、特性与实现 [J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(1): 1 – 5.
LIU Jia-xing, HE Shi-biao. Technical Consideration on an Integrated Space-Air-ground TT&C and Communication Network for Air and Space Vehicles [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011, 30(1): 1 – 5. (in Chinese)
- [7] 刘嘉兴, 文吉. Ka 频段混沌扩频测控系统的设想 [J]. 电讯技术, 2009, 49(5): 33 – 37.
LIU Jia-xing, WEN Ji. Conception for a Ka-band chaotic spread spectrum TT&C system [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(5): 33 – 37. (in Chinese)
- [8] 魏恒东, 甘露, 李立萍. 基于哈密顿量的 Duffing 振子微弱信号检测 [J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(2): 203 – 207.
WEI Heng-dong, GAN Lu, LI Li-ping. Weak Signal Detection by Duffing Oscillator Based on Hamiltonian [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(2): 203 – 207. (in Chinese)
- [9] Wei H D, Li L P, Guo J X. An efficient method of distinguishing chaos from noise [J]. Chinese Physics B, 2010, 19(5): 050505.
- [10] Wei H D, Li L P. An Efficient Method for Detecting Chaotic Spread Spectrum Sequences [C]//Proceedings of 2010 Second International Conference on Computer Modeling and Simulation. Sanya: IEEE, 2010: 244 – 248.
- [11] Kantz H, Schreiber T. Nonlinear time series analysis [M]. 2nd ed. London: Cambridge University Press, 2004.
- [12] Pikovsky A, Rosenblum M, Kurths J. Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences [M]. London: Cambridge University Press, 2001.
- [13] Parlitz U. Estimating Model Parameters from Time Series by Autosynchronization [J]. Physical Review Letters, 1996, 76(8): 1232 – 1235.
- [14] Yu D, Wu A. Comment on "Estimating Model Parameters from Time Series by Autosynchronization" [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(21): 219401.

作者简介:



魏恒东(1980—),男,四川西昌人,2010年获博士学位,现为工程师,主要研究方向为混沌理论、混沌同步和信号分析。

WEI Heng-dong was born in Xichang, Sichuan Province, in 1980. He received the Ph. D. degree in 2010. He is now an engineer. His research concerns chaos theory, chaos synchronization and signal analysis.

Email: hdwei@foxmail.com