

一种基于特定 Duffing 振子的 MPSK 信号调制识别算法

靳晓艳^{*①} 周希元^{①②}

^①(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

^②(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

摘 要: 该文利用混沌振子对噪声处理的优势, 提出一种在低信噪比条件下基于混沌理论的调制识别方案, 给出了对 MPSK 信号进行调制识别的原理与方法, 并设计了新的 Duffing 振子模型用以提升识别效果。该算法仅仅利用载波频率的先验信息, 无需对相偏、码速率、噪声功率等参数进行估计。仿真实验表明信噪比在 -5 dB 时, 3 种 MPSK 信号的正确识别概率在 95% 以上, 证明了该文算法的有效性。

关键词: 信号处理; 调制识别; 混沌系统; Duffing 振子; Poincaré 截面; MPSK

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)08-1882-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01708

A Modulation Classification Algorithm for MPSK Signals Based on Special Duffing Oscillator

Jin Xiao-yan^① Zhou Xi-yuan^{①②}

^①(National Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(The No.54 Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: A modulation classification scheme based on the chaotic theory is presented in low SNR condition by taking the advantage of the chaotic oscillator at noise management. The principle and method of the modulation classification to MPSK signal are given, and a new Duffing oscillator model is designed to improve the classification performance. The method only uses the prior information of carrier frequency, so it can be implemented without the parameter estimation of phase offset, symbol rate and noise power. Simulation experiments show that the probability of correct classification is larger than 95% for classifying 3 kinds of MPSK signals respectively when the SNR is as low as -5 dB. It verifies the validity of the algorithm.

Key words: Signal processing; Modulation classification; Chaotic system; Duffing oscillator; Poincaré section; MPSK

1 引言

通信信号的调制识别技术对信号自适应接收和智能通信等具有重要意义, 在电子对抗、情报截获、通信监视、频谱管理等多个领域都获得了广泛应用。近年来, 国内外很多文献都集中到调制识别算法研究上。其中常用的分类特征包括: 信号的瞬时幅度、频率及相位信息^[1], 高阶矩及高阶累积量^[2]和循环平稳特征^[3]等。然而, 上述方法对系统的信噪比要求比较高, 对先验信息依赖性强。

近些年来, 非线性系统复杂分岔、混沌等动力特性引起了学者的广泛关注, 随着认识的深入, 其应用研究已逐渐深入到医学、生态学、通信等许多领域^[4,5]。同时, 对噪声免疫性强是混沌系统的基本

特征之一, 这种特性为信号处理提供了新的思路。赖志慧等人^[6]将其用于极低信噪比下的微弱信号检测, 达到了极好的检测效果。Wang 等人^[7]利用 Duffing 振子实现了微弱正弦信号振幅和相位的估计。路鹏等人^[8]找到了微弱信号幅值与混沌动力系统特征指数之间的关系, 提出了一种检测微弱正弦信号幅值的改进方案。邓小英等人^[9]提出了一种新的复 Duffing 振子系统, 用来检测湮没在复高斯白噪声中的微弱复信号。然而, 这些研究大多是针对不含任何信息量的正弦信号展开的, 本文考虑充分利用混沌振子系统的抗噪声优势, 实现强噪声背景下 MPSK 信号的调制类型识别。

本文在分析了使用外激励型 Duffing 振子进行 MPSK 信号调制识别的原理及方法的基础上, 设计了适于该任务的新型 Duffing 振子系统, 将待识别信号作为外部激励引入该振子, 在大尺度周期状态

2012-12-27 收到, 2013-04-03 改回

*通信作者: 靳晓艳 jinxiaoyan0201@163.com

下, 通过系统周期解的 Poincaré 映射判定信号调制类型, 最后对调制识别性能做了仿真实验。

2 信号模型

假设 $r(t)$ 为接收到的含噪 MPSK 信号, 其具体表达式为

$$\begin{aligned} r(t) &= s(t) + v(t) \\ &= \sqrt{2E} \sum_k \cos(2\pi f_c t + \phi_k + \phi_c) \\ &\quad \cdot \mu_{T_d}(t - kT_d) + v(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $s(t)$ 为感兴趣的有用信号, $v(t)$ 是零均值、功率谱密度为 N_0 的平稳加性噪声。 E 为信号功率, f_c 为载波频率, ϕ_c 为载波初始相位, $\mu_{T_d}(t)$ 是基带码元成形脉冲, T_d 为码元周期, $\phi_k \in \{2\pi m/M\}$, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 为信号第 k 个码元的初始相位, M 为 MPSK 信号的调制阶数, $M = 2, 4, 8$ 分别对应 BPSK, QPSK 和 8PSK 信号。

3 调制识别原理

利用混沌系统对噪声免疫的特性, 将待识别信号作为混沌系统的外部驱动, 使该系统处于特定状态下, 根据系统解随驱动信号调制制式变化情况, 判定信号类型。

混沌是某些非线性系统所特有的一种运动形态。常见的描述混沌运动的方程有 Duffing 方程、Lorenz 方程、Chen 方程等。通过考察各类混沌系统对调制类型的敏感性, 我们将重点放在了 Duffing 方程上。Duffing 方程在非线性动力学系统的研究中占有重要地位, 它是 Duffing 于 1918 年引入的一个带有非线性恢复力项的受迫系统, 可用于描述许多动力学现象。其表达式为

$$\ddot{x} + \delta\dot{x} + \alpha x + \beta x^3 = g(t) \quad (2)$$

式中, δ 为阻尼系数; $(\alpha x + \beta x^3)$ 为非线性恢复项, $g(t)$ 为外加策动力。

由于 MPSK 信号的调制信息完全反映在信号相

位上, 因此实现 Duffing 振子的 MPSK 信号识别的基础是振子的非线性运动对信号相位变化敏感。以常用的非线性恢复力为 $(-x + x^3)$ 的 Duffing-Holmes 型混沌系统为例来说明基于 Duffing 振子的 MPSK 信号调制识别原理。当激励信号为周期信号时, Duffing-Holmes 型混沌系统的方程为

$$\ddot{x} + \delta\dot{x} + x^3 - x = a \cos(2\pi f_c t + \varphi) \quad (3)$$

其中 $a \cos(2\pi f_c t + \varphi)$ 为单音激励信号。根据 Levinson 的周期解存在性定理^[10], 该方程存在与激励信号周期相同的周期解, 即方程周期解的周期为 $T_c = 1/f_c$ 。需要指出, 周期解是指混沌系统进入稳定周期相态条件下的系统解, 但并非所有幅值的激励信号都能使系统进入稳定周期相态。所以, 混沌系统的动力学行为与 a 的大小有关。仿真实验表明随着 a 的变化, 系统历经同宿轨道、分岔、混沌轨迹、临界周期轨道、大尺度周期等各个状态。

实验中我们发现在大尺度周期状态下, 方程的解随信号相位的变化而有所改变。为便于观察激励信号相位 φ 对系统解的影响, 这里引入 Poincaré 映射的方法, 它可将 N 维的连续动力系统化为 $N-1$ 维的离散动力系统研究, 所得截面上点的演化构成了 Poincaré 映像。定义 Poincaré 映射 $P: \Sigma_\theta \rightarrow \Sigma_\theta: (x_1(nT_c), x_2(nT_c)) \rightarrow (x_1((n+1)T_c), x_2((n+1)T_c))$, 如图 1 所示。

其中 $T_c = 1/f_c$ 为加入系统的激励信号的载波周期, 同时也是系统周期解的周期, $(x_1(t), x_2(t))$ 构成了式(3)的相图。这里将 Poincaré 映射集合的时间参数 τ 取为系统策动力的周期 T_c , 也即系统周期运动的周期。方法是对系统相图每隔时间 T_c 进行采样, 生成 Poincaré 映射集合。若系统在输入信号扰动下做周期运动, Poincaré 映射集合内只有唯一的映射点, 即不动点。然而不动点在相轨迹上的位置取决于相位 φ , 图 2 为 φ 分别在 $[0, 2\pi]$ 上间隔 $\pi/4$ 取值时不动点的位置分布。

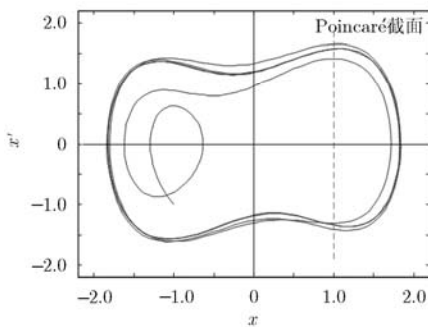


图 1 Poincaré 映射

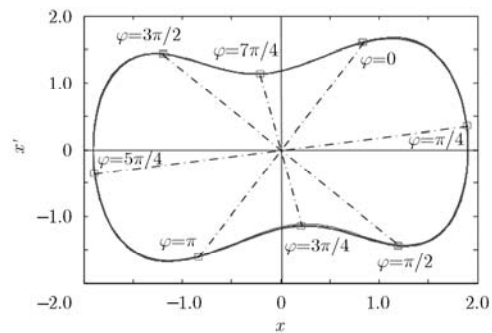


图 2 Poincaré 截面随 φ 的变化规律

基于此原理,若以 MPSK 信号作为激励信号引入该系统,由于信号在不同码元周期内的相位不同,因此在观测时间足以涵盖所有可能调制相位的情况下, MPSK 信号驱动的系统会在 Poincaré 截面上留下 M 个不动点。 $M = 2, 4, 8$ 分别对应 BPSK, QPSK 和 8PSK 信号,于是可通过观察 Poincaré 截面上不动点个数来实现 MPSK 信号的调制类型识别。

上述分析是在理想假设下进行的,即作为驱动的 MPSK 信号未受噪声污染。现实情况中接收到的待识别信号都或多或少的含有干扰噪声,此时 Poincaré 截面上的映射点不会固定为几个不动点,而是以几个不动点为中心,由各自的中心向外发散。我们发现 Duffing-Holmes 型混沌系统在大尺度周期状态下对噪声的抗干扰性能不太令人满意,受噪声影响 Poincaré 截点的发散程度较大。所以若要实现 MPSK 信号的识别,需要设计合适的 Duffing 振子系统。

4 设计 Duffing 振子模型

建立一个其动力学行为对待识别信号的调制类型(即 MPSK 信号的相位变化)极其敏感且对噪声免疫性强的混沌系统是调制识别的首要条件。由于当外加信号确定时,系统的特性主要取决于系统的非线性恢复力项,因此主要考虑选择合适的非线性项。由于非线性项幂次的提高会引起计算复杂度骤增,为控制算法计算量,所以最高幂次仍沿用 3 次,并且偶次幂项将引起相图的不对称,因此恢复力项仍沿用 $(\alpha x + \beta x^3)$ 的形式。

本文介绍的基于 Duffing 振子的调制识别方法,是在系统处于大尺度周期状态下进行的,因此需保证所设计的系统在特定条件下存在周期解。根据文献[10]关于周期解的存在性定理,当 $\beta > 0$ 时,系统存在与策动力同周期的周期解,而对于 α 的正负没有严格限定。在满足该条件下 α 和 β 的取值决定了

系统的性能,仿真实验表明,系数 α 及 β 增大时,系统解随码元相位变化的敏感性增大,即当码元相位跳变时, Poincaré 截面上映射点转移到下一预期位置的速度增快,中间的过渡点减少;系数 α 及 β 减小时,系统解对噪声的适应性增强,即 Poincaré 截面上的映射点发散程度减小。综合考虑以上因素,将 α 及 β 分别取为 1 和 0.01。因此,本文中选用式(4)定义的混沌振子模型作为 MPSK 信号调制识别模型:

$$\ddot{x} + \delta \dot{x} + x + 0.01x^3 = \rho r(t) \quad (4)$$

其中 δ 为阻尼系数, $(x + 0.01x^3)$ 为恢复力项, ρ 为常数调节因子, $r(t)$ 为待识别的 MPSK 信号。该系统的混沌状态相图与大尺度周期状态相图分别如图 3(a)和图 3(b)所示。

为了使振子方程适应于高频信号的情况,对式(4)进行尺度变换,使 $t = \omega_c \xi$, ω_c 为待识别信号载波角频率,得到

$$x(t) = x(\omega_c \xi) = y(\xi) \quad (5)$$

$$\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{\omega_c} \frac{dy(\xi)}{d\xi} = \frac{1}{\omega_c} \dot{y}(\xi) \quad (6)$$

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{\omega_c^2} \frac{d^2 y(\xi)}{d\xi^2} = \frac{1}{\omega_c^2} \ddot{y}(\xi) \quad (7)$$

将式(5),式(6),式(7)代入式(4)得

$$\frac{1}{\omega_c^2} \ddot{y}(\xi) + \frac{\delta}{\omega_c} \dot{y}(\xi) + y(\xi) + 0.01y^3(\xi) = \rho r(t) \quad (8)$$

使 $y(\xi) = x_1$, $x_2 = (1/\omega_c)\dot{x}_1$, $\xi = t$, 得到系统状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_c x_2 \\ \dot{x}_2 &= \omega_c (-x_1 - 0.01x_1^3 - \delta x_2 + \rho r(t)) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

5 调制识别算法

假设式(1)中载波频率 f_c 已由其它算法估计得到,其余参数均未知。基于 Duffing 振子的 MPSK 信号调制识别算法框图设计如图 4 所示。

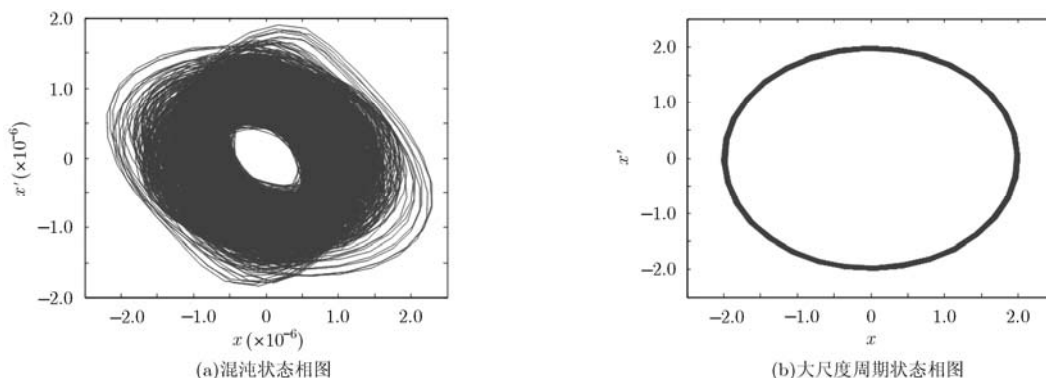


图3 系统相图

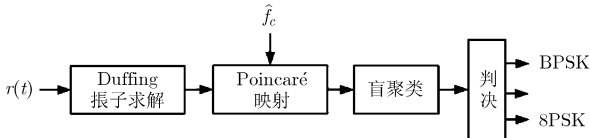


图4 识别算法框图

在实际应用中，可以由操作人员通过观察 Poincaré 映射平面上不动点的分布，直观判断出信号类型。但为了减少人工操作时主观因素的影响，同时便于分析算法性能并与其它算法进行比较，因此需要采用盲聚类算法使计算机能够自动得到 Poincaré 不动点中心的数目，从而对信号类型作出判别。文献[11]提出的减法聚类算法不需要事先知道聚类中心的数目，且计算量小，易于实现。本文选择此聚类算法完成 Poincaré 映射点的聚类，通过聚类算法获得聚类中心数目并给出调制阶数。

对式(9)的 Duffing 振子进行求解时需要注意的是，由于非线性项的存在，无法得到其解析解，因此采用四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)法^[12]进行数值求解。龙格-库塔法使连续系统变为一个离散动态系统，这样便会不可避免地引入截断误差(truncation error)，它是由于迭代计算过程中对无穷泰勒级数的截断引起的。截断误差主要取决于迭代步长的选取，步长过大会引入较大的截断误差，使微分方程的解严重偏离其理论解；而步长过小则会加重计算负担，因此兼顾精确度与计算复杂度，本文中选取步长 $h = 1/f_s$ ， f_s 为信号采样频率。

基于上述分析，本文所提出的 MPSK 信号的调制识别方法的步骤为：

- (1) 将待识别信号作为外部激励引入式(9)所示的 Duffing 振子系统，调节参数 ρ 使系统处于大尺度周期状态；
- (2) 采用四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)法进行数值求解；
- (3) 对周期解相图进行 Poincaré 映射：

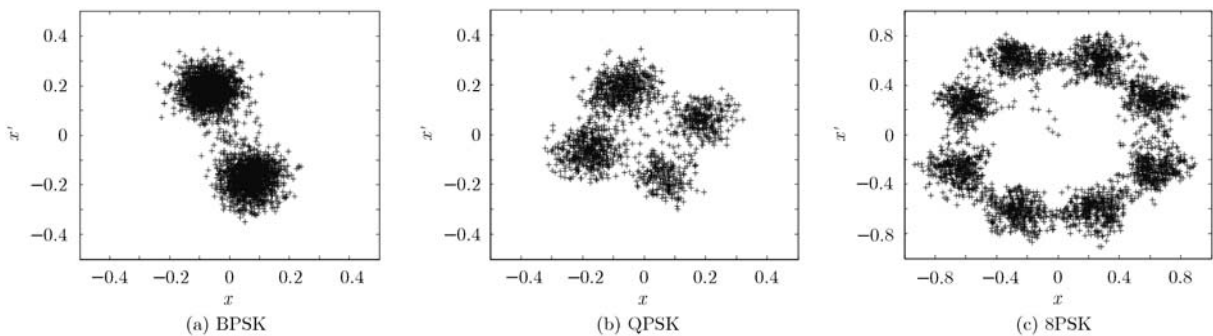


图5 MPSK 信号的 Poincaré 映射图

$$(x_1(nT_c), x_2(nT_c)) \rightarrow (x_1((n+1)T_c), x_2((n+1)T_c))$$

其中 T_c 为信号载波周期；

(4) 对 Poincaré 映射点进行减法聚类，根据聚类中心数目 N_c 判定信号类型。判决规则为：当 $N_c \leq 2$ 时判别为 BPSK 信号；当 $2 < N_c \leq 4$ 时判别为 QPSK 信号；当 $N_c > 4$ 时判别为 8PSK 信号。

6 仿真结果与分析

为了检验本文算法的有效性，这里做了如下仿真实验。仿真中假设调制样式包括 {BPSK, QPSK, 8PSK} 3 种，信号载波频率为 $f_c = 10$ kHz，采样频率为 $f_s = 80$ kHz，码元速率为 $f_d = 0.5$ kHz，成形脉冲采用滚降系数为 0.7 的升余弦滤波器。采用平稳高斯白噪声序列作为观测噪声模型，信噪比定义为信号带宽内信号与噪声的平均功率之比。在下面的计算机仿真实验中，式(9)所示 Duffing 振子的相关参数分别设置为：阻尼系数为 $\delta = 0.25$ ，系统初值 $x(0) = [0, 0]$ ，常数调节因子 $\rho = 1$ 。

仿真 1 Poincaré 映射图 分别将 BPSK, QPSK 和 8PSK 3 种信号作为外部激励引入式(9)的 Duffing 振子系统，观测信号码元个数为 100，信噪比为 -5 dB，图 5(a)~5(c) 分别为 3 种信号对应的 Poincaré 截面图。可以看出，由于受到噪声和码元跳变以及脉冲成形的影响，Poincaré 截面上并非为几个固定的不动点，而是由中心点向外发散，但仍可直观的辨识出不动点个数，从而实现 MPSK 信号调制类型识别。由此可知，所设计的 Duffing 振子系统在大尺度周期状态下对噪声具有很强的抑制能力。

仿真 2 载频估计误差对算法分类性能的影响

本文算法的其中一个环节是对 Duffing 振子的输出做 Poincaré 映射，即以载频周期进行采样，因此载频估计的精度直接影响算法的性能。本实验为了考察载频估计偏差对算法分类性能的影响。实验中假设 BPSK, QPSK 和 8PSK 3 种调制样式等概率出现，定义载频估计的相对偏差 $\Delta f_c = |f_c - \hat{f}_c| / f_c$ ，

其中 \hat{f}_c 为由某种估计算法得到的载频估计值。图 6 给出了在观测码元个数为 100、信噪比为 -5 dB 时, 500 次独立实验统计得到的正确识别概率随 Δf_c 的变化曲线。由图可知, 当 Δf_c 小于 10^{-4} 即载频估计精度达到 1 Hz 时, 算法识别性能受载频估计偏差的影响很小。现有一些高性能的载频估计算法, 例如线性调频 Z 变换(CZT)法^[13], 可以满足该估计精度的要求。

仿真 3 分类性能比较 图 7 为本文算法与文献[2]基于码元同步采样平稳序列模型的高阶累量分类算法、以及文献[3]基于循环累量不变量的分类算法的性能比较。分别使用 3 种算法在同一信噪比下进行 500 次独立仿真识别, 获得正确识别概率。由图可知, 本文算法明显优于另两种算法, 在信噪比为 -5 dB 时, 本文算法的正确识别概率大于 95%, 而文献[2]与文献[3]算法, 此时已无法有效地识别信号。原因在于低信噪比条件下噪声的影响使得高阶累量、高阶循环累量估计的扰动急剧增加, 导致分类性能下降, 而本文算法中设计的非线性振子系统在

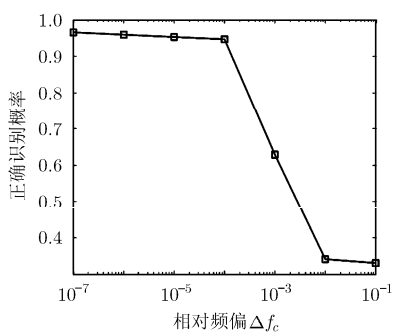


图 6 载频估计误差对识别性能的影响

大尺度周期状态下对噪声具有很强的抑制能力, 分类特征受噪声影响较小, 因此。可见本文算法在低信噪比条件下的优越性。

由于常数调节因子 ρ 的存在, 算法识别性能并不依赖于 MPSK 信号的幅度, 并且随着载波初始相位的变化, Poincaré 映射图仅仅整体随之产生旋转, 对识别效果不会造成影响。又因为 Poincaré 映射是对每个载波周期内零相位处系统解的统计分布, 而统计可从任意时刻开始, 所以定时误差对该算法无影响。此外, 载波频率的大小不会影响算法性能, 这是因为算法中采用的适用于高频段的 Duffing 振子系统完全是由式(4)的标准系统进行尺度变换得到的(参见式(4)~式(8)), 无论 ω_c 取何值, 变换后的系统都与式(4)等价, 因此系统性能不会有所改变。与此同时, 算法要求待识别信号具有较低的码元速率, 这是因为码元频繁跳变会使大量的 Poincaré 截点成为不在任何聚类中心有效范围内的过渡点, 这就大大增加了聚类错误的风险, 实验表明码元速率至少为 15 倍载频时, 算法具有较好的分类性能。

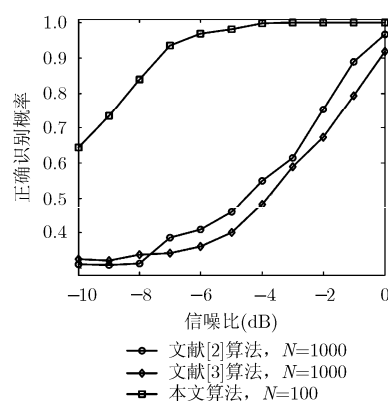


图 7 算法性能比较(N 为观测码元个数)

7 结束语

本文首次将 Duffing 系统引入调制识别问题, 基于提出了基于特定 Duffing 振子的 MPSK 信号调制识别算法。该算法仅仅利用载波频率的先验信息, 无需进行码元同步, 并且对信号幅度、载波初始相位以及载波频率的变化具有不变性。仿真表明该算法具有较强的噪声免疫力, 在信噪比较低的情况下仍能达到满意的识别效果。

参考文献

- [1] Nandi A K and Azzouz E E. Algorithms for automatic modulation recognition of communication signals[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1998, 46(4): 431-436.
- [2] Swami A and Sadler B. Hierarchical digital modulation classification using cumulants[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(3): 416-429.
- [3] 陈卫东, 杨绍全. 基于循环累量不变量的 MPSK 信号调制识别算法[J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(3): 320-325.
Chen Wei-dong and Yang Shao-quan. Algorithm for modulation classification of MPSK signals based on cyclic cumulant invariants[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(3): 320-325.
- [4] 张琪昌, 赵蔷薇, 王炜. 强线性振动系统的通用化求解程序及应用[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(8): 1-4.
Zhang Qi-chang, Zhao Qiang-wei, and Wang Wei. Universal solving program and its application in a strongly nonlinear oscillation system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(8): 1-4.
- [5] 刘桂珍, 刘丽群, 于影. 非线性振动理论在脑电信号分析中的

- 应用[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(1): 32-36.
- Liu Gui-zhen, Liu Li-qun, and Yu Ying. Application of nonlinear theory for electroencephalogram signal analysis[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2012, 10(1): 32-36.
- [6] 赖志慧, 冷永刚, 孙建桥. 基于 Duffing 振子的变尺度微弱特征信号检测方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 1-9.
- Lai Zhi-hui, Leng Yong-gang, and Sun Jian-qiao. Weak characteristic signal detection based on scale transformation of Duffing oscillator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 1-9.
- [7] Wang G Y, Zheng W, and He S L. Estimation of amplitude and phase of a weak signal by using the property of sensitive dependence on initial conditions of a nonlinear oscillator[J]. *Signal Processing*, 2002, 82(1): 103-115.
- [8] 路鹏, 李月. 微弱正弦信号幅值混沌检测的一种改进方案[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 527-529.
- Lu Peng and Li Yue. A modified chaos based weak sinusoidal signal amplitude detection approach[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 527-529.
- [9] 邓小英, 刘海波, 龙腾. 一个用于检测微弱复信号的新 Duffing 型复混沌振子[J]. 科学通报, 2012, 57(13): 1176-1182.
- Deng Xiao-ying, Liu Hai-bo, and Long Teng. A new complex Duffing oscillator used in complex signal detection[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(13): 1176-1182.
- [10] Levinson N and Smith O K. A general equation for relaxation oscillations[J]. *Duke Mathematical Journal*, 1942, 9(2): 382-403.
- [11] Chiu S L. Fuzzy model identification based on cluster estimation[J]. *Journal on Intelligent and Fuzzy Systems*, 1994, 2(3): 267-278.
- [12] Cartwright J H E and Piro O. The dynamics of Runge-Kutta methods[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1992, 2(3): 427-449.
- [13] Rabiner L and Gold B. Theory and Application of Digital Signal Processing[M]. NJ: Prentice-Hall, 1975: 395-399.
- 靳晓艳: 女, 1984年生, 博士生, 研究方向为调制识别与通信对抗.
- 周希元: 男, 1944年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信息对抗与电子战.