

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.09.001

引用格式:刘立东,宋焕生.解析解混沌雷达系统的多目标测距[J].电讯技术,2015,55(9):947-952. [LIU Lidong, SONG Huansheng. Multi-target Distance Measurement of Analytical Solution Chaotic Radar System[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(9):947-952.]

解析解混沌雷达系统的多目标测距*

刘立东**, 宋焕生

(长安大学 信息工程学院, 西安 710064)

摘要:针对传统混沌雷达对多目标测距困难的问题,提出了一种建立在解析解系统上的混沌雷达多目标测距方法。该方法使用解析解混沌系统中的连续信号作为雷达发射信号,并把解析解混沌系统中的二值离散序列经移位寄存器保存在雷达接收端,通过保存的二值离散序列能够准确重构雷达发射信号模板。使用该模板和回波信号进行匹配滤波,通过匹配滤波输出信号的峰值得到待测目标的距离。该方法能够在-10 dB信噪比条件下实现多目标测距,且雷达接收端因为只需保存二值离散信号所以需要的存储空间小,实现过程成本低廉。仿真实验验证了提出方法的有效性。

关键词:解析解系统;混沌雷达;混沌信号处理;多目标雷达测距;二值离散序列

中图分类号:TN911.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)09-0947-06

Multi-target Distance Measurement of Analytical Solution Chaotic Radar System

LIU Lidong, SONG Huansheng

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: For the problem of multi-target distance measurement of traditional chaotic radar system, a multi-target distance measurement method based on analytical solution system is proposed. In the method, the continuous signal of the analytical solution chaotic system is designed as the radar transmit signal. The binary discrete sequence of the analytical solution chaotic system is saved in the radar receiver by the shift register. The transmit signal copy can be reconstructed accurately by the saved binary discrete sequence in the radar receiver. The matched filter is then realized by the copy and the receiving signal. Target distance is obtained through the peak of the output of the matched filter. Multi-target distance measurement can be realized under -10 dB signal-to-noise ratio (SNR) by the proposed method. Moreover, the storage is easily realizable and the cost is cheap since the radar receiver only needs to save the binary discrete signal which requires small space to store information. Finally, numerical simulations show the effectiveness of the proposed method.

Key words: analytical solution system; chaotic radar system; chaotic signal processing; multi-target radar distance measurement; binary discrete sequence

1 引言

混沌信号是由确定机制产生,但是在统计上具

有随机性、类噪声特点的信号。以混沌信号作为载波或者调制信号的雷达称为混沌雷达^[1]。混沌雷

* 收稿日期:2015-01-22;修回日期:2015-05-15 Received date:2015-01-22;Revised date:2015-05-15

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61401045);中国博士后科学基金项目(2014M560736);陕西省自然科学基金青年科学基金资助项目(2015JQ6239);中央高校基本业务费基金资助项目(CHD2014G1241045)

Foundation Item: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (No. 61401045); The China Postdoctoral Science Foundation (2014M560736); The Young Scientists Fund of the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2015JQ6239); Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (CHD2014G1241045)

** 通讯作者:liulidong_1982@126.com Corresponding author:liulidong_1982@126.com

达波形由于具有良好的电磁兼容性、“图钉形”模糊函数、低截获概率等特点,因此具有高距离分辨率和高速度分辨率,能够精确探测目标,混沌雷达的研究也成为近些年现代雷达研究的热点^[2-12]。

测距研究是混沌雷达研究的一个重要领域,其最初的研究始于 2000 年, Narayanan 等学者通过把发射信号经延迟线延迟保存在接收端,并通过被延迟的信号和回波信号进行匹配滤波得到目标距离^[2]。然而,这种方法成本较高,特别是当信号带宽较宽时不仅发射端信号的延迟很难物理实现,而且接收端需要巨大的存储空间来存储雷达发射信号。后来一些学者在此基础上进行了一系列改进,如文献[6]提出使用混沌同步的方法在接收端从回波信号中提取雷达发射信号复本,以此作为参考信号和回波信号进行互相关处理,并通过互相关函数的峰值信息得到目标距离;文献[7]提出基于混沌信号初始值估计的方法从回波信号中分段估计信号初始值并重构雷达发射信号模板,用该模板与回波信号作相参信号处理得到目标距离;文献[8]提出一种在发射混沌信号中嵌入参考正弦信号,并通过比较参考正弦信号和回波正弦信号相位差得到回波信号的延迟时间,从而得到目标距离。上述方法都可归纳为通过对回波的信号处理获得所需的参考信号,从而通过互相关或相位差得到目标距离。然而,当雷达探测多个目标的时候,上述方法需要设计较为复杂的多目标信号重构方法或信号提取算法,为了解决这些问题,需要设计新的测距方法。

近些年兴起的解析解混沌系统^[13-17]研究为解决上述问题提供了新的思路。解析解混沌系统打破了人们普遍认为的观点——非线性的混沌系统的解不能线性表示。Corron 等学者从原理上证明了存在一类由二阶微分方程和离散二值序列构成的混沌系统,这类混沌系统的解可由固定基函数和二值离散序列的线性卷积表示。

本文在此系统上提出了一种解析解混沌雷达系统的多目标测距方法。在该方法中,雷达发射端发送连续混沌信号,与此同时在雷达接收端通过移位寄存器保存混沌系统的二值离散序列。由于解析解混沌系统的连续信号可由二值离散序列完全决定,因此获得了二值离散序列就可以准确重构雷达发射信号模板,从而以此和回波信号进行匹配滤波,并通过匹配滤波输出信号峰值获得目标距离。这种方法通过把发射端系统中的离散信号通过移位寄存器保存在接收端,既减小了接收端的存储成本,又可以准确重构发射信号模板从而实现多目标测距。本文方

法为解决传统混沌雷达多目标回波信号处理复杂、接收端需大容量存储空间的问题提供了一个新的思路。

2 解析解混沌系统

解析解混沌系统是由 Corron 等学者提出的一类混沌系统^[13-17]。这类混沌系统由一个二阶微分方程决定的连续混沌信号和一个二值离散序列构成。本文选择 Corron 首次提出的经典解析解混沌模型^[13],其表达式为

$$\begin{cases} x(t) = x_1 \\ \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -2\beta x_2 - (\omega^2 + \beta^2)(x_1 - s) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω 和 β 为系统参数; s 由连续状态 $x(t)$ 的瞬时符号及 $x(t)$ 的一阶导数确定,它们之间的关系为

$$\dot{x}(t) = 0 \Rightarrow s(t) = H(x(t) - 1), \quad (2)$$

$H(x)$ 为 Heaviside 函数:

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(1)决定的混沌系统的解析解为

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{[t]} s[n] \cdot P(t-n). \quad (4)$$

式中,

$$s[n] = H(x(n) - 1), n = [t], \quad (5)$$

$$P(t) = \begin{cases} \left(\frac{1}{\omega^2 + \beta^2}\right) \left[1 - e^{-\beta t} (\cos \omega t + \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t)\right], & [t] = 0 \\ \left(\frac{1}{\omega^2 + \beta^2}\right) e^{\beta t} (\cos \omega t + \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t), & [t] \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $[t]$ 表示时间 t 的整数部分, e 为自然对数, $P(t)$ 为混沌系统解的固定基函数。该混沌系统的吸引子见图 1。

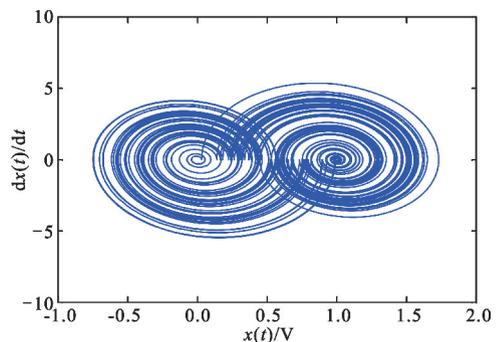


图 1 解析解混沌系统的吸引子

Fig. 1 The attractor of analytical solution chaotic system

从式(4)~(6)可以看出,式(1)决定的混沌系统中的连续信号可完全由提前设定的二值离散序列 $s[n]$ 决定,当获得 $s[n]$ 的值后就可以准确重构系统中的混沌信号,这是解析解混沌系统和传统混沌系统的不同之处。

3 解析解混沌系统多目标雷达测距方法

本文使用解析解混沌系统产生的连续信号作为雷达的发射信号,解析解混沌系统中提前设定的二值离散序列经移位寄存器保存在接收端,然后通过接收端的二值序列重构发射信号,并以此和回波信号匹配滤波,其工作原理见图 2。

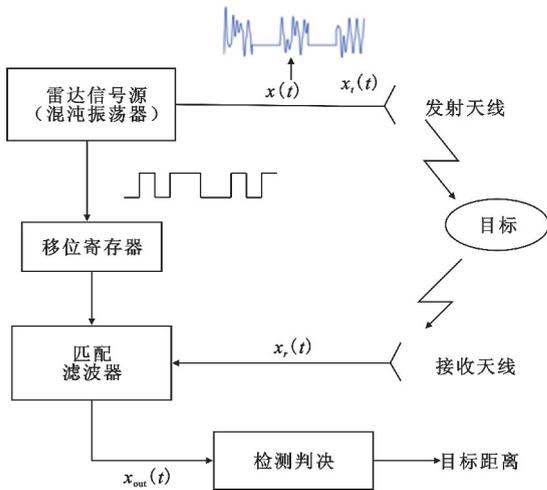


图 2 基于解析解系统混沌雷达测距原理
Fig. 2 Principle of radar target ranging based on analytical solution chaotic system

本文混沌雷达发射信号 $x(t)$ 由式(1)决定,经 n 个目标反射后的回波信号 $x_r(t)$ 为

$$x_r(t) = \sum_{i=1}^n x(t-t_i) + n(t) \quad (7)$$

式中, t_i 为第 i 个目标的回波延迟时间, $n(t)$ 为高斯白噪声。

在连续信号被发射的同时,雷达接收端通过移位寄存器保存混沌系统中的二值离散序列。从式(4)~(6)可以看出,当系统参数 ω 和 β 确定后,发射信号 $x(t)$ 完全由二值离散序列决定。因此,接收端通过二值离散序列可以准确重构 $x(t)$, 不仅解决了传统混沌雷达直接通过延迟线延迟 $x(t)$ 难以物理实现的问题,而且避免了设计复杂的信号处理算法从多目标回波信号中提取原始发射信号的难题。

设经过二值离散序列重构的发射信号为 $x'(t)$, $x'(t)$ 可由离散二值序列 $s[n]$ 完全决定,其和混沌

系统初始值 $x(0)$ 及信噪比(SNR)无关。由于 $s[n]$ 为数字信号,其经移位寄存器保存至接收端不会改变其数值,因此,在理论上重构信号 $x'(t)$ 除了开始阶段由于初始值的不同而和 $x(t)$ 有细微差别外,两个信号误差趋于 0。图 3 给出了雷达发射端混沌信号和在接收端经二值离散序列重构信号的对比,从图中可以看出两条曲线几乎重合(除了开始阶段重构信号和实际发射信号因初始值不同产生了误差),从而表明重构信号和原始信号间的误差趋于 0。

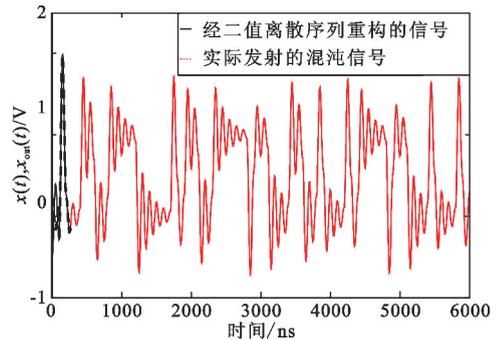


图 3 经二值离散序列重构的信号和发射信号对比图
Fig. 3 Comparison between the signal reconstructed by binary discrete sequence and the transmit signal

$x'(t)$ 和回波信号 $x_r(t)$ 匹配滤波后的输出信号(本质上是发射信号和回波信号的互相关运算结果) x_{out} 为

$$\begin{aligned} x_{out}(\tau) &= \int_0^T x'(t)x_r(t+\tau) dt = \\ &= \int_0^T x'(t) \left[\sum_{i=1}^n x(t-t_i+\tau) + n(t+\tau) \right] dt = \\ &= \int_0^T x'(t)x(t-t_1+\tau) dt + \int_0^T x'(t)x(t-t_2+\tau) dt + \\ &\quad \dots + \int_0^T x'(t)x(t-t_n+\tau) dt + \int_0^T x'(t)n(t+\tau) dt. \end{aligned} \quad (8)$$

由于信号 $x'(t)$ 和高斯白噪声信号 $n(t)$ 无关,因此式(8)最后一项 $\int_0^T x'(t)n(t+\tau) dt \rightarrow 0$, 故式(8)可写成

$$\begin{aligned} x_{out}(\tau) &= \int_0^T x'(t)x(t-t_1+\tau) dt + \dots + \\ &\quad \int_0^T x'(t)x(t-t_n+\tau) dt. \end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)中可以看出,当 τ 分别取 t_1, t_2, \dots, t_n 时,理论上 $x_{out}(\tau)$ 的值为 $x'(t)$ 自相关函数的峰值,通过这些峰值所对应的时刻,按照式(10)分别得到目标的距离。

$$d_i = ct_i/2. \quad (10)$$

式中, c 为电磁波传播速度, d_i 为第 i 个目标的距离。

综上, 本文给出的方法实现过程总结如下:

(1) 混沌雷达信号源由式(1)决定, 信号源同时产生连续混沌信号和离散二值序列;

(2) 混沌雷达采用脉冲方式发射, 每个脉冲内的信号由式(1)中的连续混沌信号构成;

(3) 混沌雷达在发射信号的同时, 信号源把二值离散序列经移位寄存器保存至雷达接收端, 接收端经过二值离散序列按照式(4)~(6)重构雷达发射信号模板;

(4) 多目标回波信号和重构发射信号模板按照式(8)和式(9)进行匹配滤波;

(5) 经检测判断后得到多目标回波信号的延迟时间, 代入式(10)得到目标的距离。

4 数值仿真分析

下面通过仿真实验来验证本文理论的有效性。

设雷达信号带宽为 500 MHz, 信号采样频率 f_s 为 1 GHz, 脉冲宽度为 1.5 μ s, 雷达发射信号为脉冲内连续信号。发射信号 $x(t)$ 由式(1)决定, 其中式(1)中参数 $\omega = 2\pi$, $\beta = 0.81\ln 2$, 雷达发射信号波形见图 4, 其中蓝色虚线框内的黑色实线信号为脉冲周期内实际发射的连续混沌信号, 每个脉冲对应的混沌信号均不同, 这也为混沌雷达提供了理论上高的距离分辨率和高的测距精度; 蓝色虚线框内的红色虚线为二值离散序列, 实际发射波形不包含二值离散序列, 二值离散序列的作用是经移位寄存器后保存在接收端以便重构雷达发射信号。

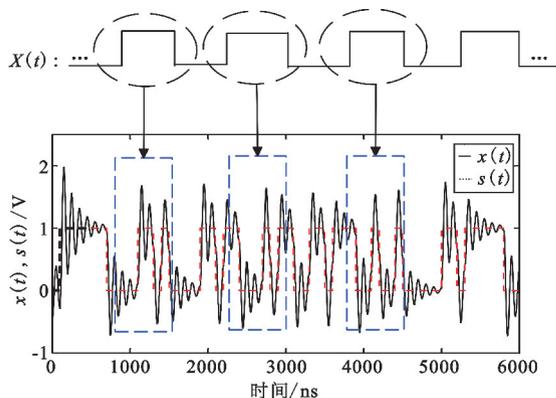


图 4 雷达发射脉冲串示意图及单个脉冲内信号波形
Fig. 4 Radar pulse train diagram and single pulse waveform

下面给出 3 组仿真实验: 无噪声情况下 3 个待

测目标距离分别为 150 m、180 m 和 225 m; 信噪比为 -10 dB 条件下 3 个待测目标距离分别为 150 m、180 m 和 225 m; 信噪比为 -10 dB 条件下 3 个距离较近待测目标距离分别为 150 m、160 m 和 170 m, 其实验结果见图 5~7。

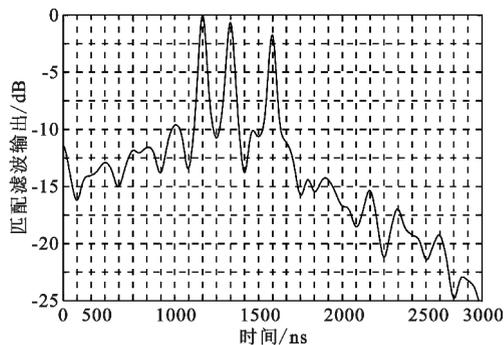


图 5 第 1 组实验匹配滤波输出
Fig. 5 The matched filter output of experiment 1

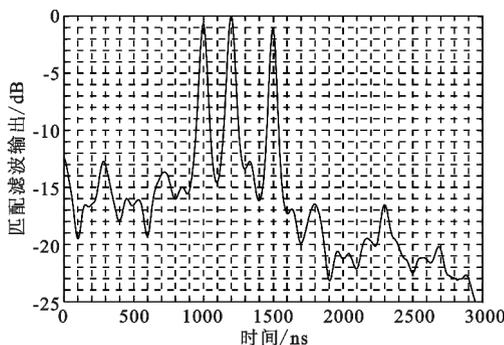


图 6 第 2 组实验匹配滤波输出
Fig. 6 The matched filter output of experiment 2

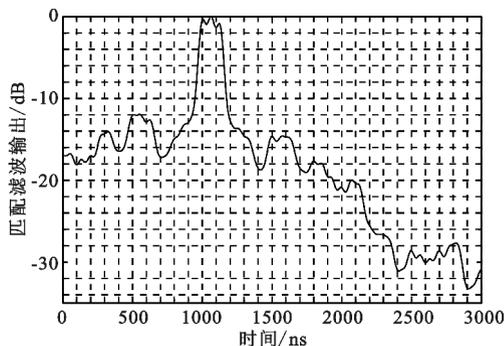


图 7 第 3 组实验匹配滤波输出
Fig. 7 The matched filter output of experiment 3

从图 5 中可以看出, 第 1 组实验无噪声条件下匹配滤波输出(发射信号和回波信号互相关输出)有 3 个峰值, 其对应的信号延迟时间分别为 1000 ns、1200 ns 和 1500 ns。把得到的延迟时间代入式(10), 得到目标距离分别是 150 m、180 m 和

225 m。由于假设的目标距离均是 $c/2f_s$ 的整数倍,所以测距没有误差。

从图 6 中可以看出,第 2 组实验在信噪比为 -10 dB 条件下匹配滤波输出峰值对应的信号延迟时间依然为 1000 ns、 1200 ns 和 1500 ns。因此,信噪比为 -10 dB 的噪声对测距影响不大(当信噪比低于 -10 dB 时,测距效果会受影响,信噪比高于 -10 dB 时测距误差受噪声影响较小,测量误差主要是由于待测目标分布情况引起,本文方法信噪比和测距误差均方值仿真见图 8),其原因是本文直接对发射混沌系统中的二值离散序列处理,根据解析解混沌系统存在固定基函数的性质和连续混沌信号可由二值离散序列和固定基函数线性卷积而成的原理,在接收端由式(4)~(7)可以准确重构雷达发射信号,且在重构信号时无需获得混沌信号的初始值,只要已知二值离散序列,就可以准确重构混沌信号。

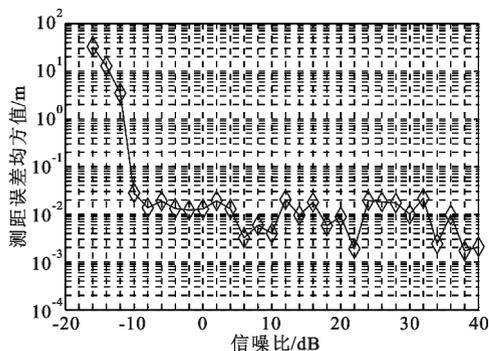


图 8 信噪比和测距误差均方值关系

Fig. 8 The relationship between SNR and mean square of distance measurement

从图 7 中可以看出,第 3 组实验在信噪比为 -10 dB 条件下匹配滤波输出峰值对应的信号延迟时间为 1000 ns、 1066 ns 和 1133 ns,计算得到设定的距离差为 10 m 的目标距离为分别为 150 m、 159.9 m 和 169.95 m,误差分别为 0 m、 0.1 m 和 0.05 m。

以上 3 组实验表明本文方法对多目标测距是可行的,特别是在噪声中对距离较近的 3 个目标依然能够进行距离测量。本文算法测距误差的均方根为 $c/(4\sqrt{3}f_s)$,距离分辨率为 $c/2B$ 。

接下来给出在前文相同信号带宽、采样频率及脉冲宽度条件下多种方法对单个目标测量的效果,见表 1。其中单个目标距离在 $150 \sim 160$ m 之间随机产生,仿真次数为 20 次。从表 1 中可以看出,本文方法和文献[2]方法相比具有几乎相同的测距效果,但是文献[2]中的方法需要把高频连续信号通

过物理延迟的方法存储在接收端,其成本昂贵且不易工程实现;而本文只需保存离散二值数字信号,从而大大节约了成本。本文方法和文献[6-8]方法相比具有较强的噪声鲁棒性,其原因是本文方法把提前设定的二值离散序列保存至接收端,并通过其重构混沌发射信号,整个重构过程并未受到噪声影响;而文献[6-8]方法均是通过回波信号重构发射信号,当噪声较强时其信号重构效果受影响;此外,文献[6-8]方法很难对多目标回波信号进行处理。

表 1 测距方法比较

Table 1 The comparison of distance measurement methods

方法	测量误差均方值/m			
	40 dB	20 dB	0 dB	-10 dB
文献[2]	0.002	0.009	0.017	0.018
文献[6]	0.005	0.013	0.026	6.786
文献[7]	0.007	0.011	0.031	5.231
文献[8]	0.008	0.011	0.025	9.231
本文	0.007	0.012	0.011	0.021

5 结束语

本文提出了一种基于解析解混沌系统的多目标雷达测距方法,通过把解析解混沌系统的二值离散序列经移位寄存器保存在接收端重构雷达发射信号,从原理上解决了宽带混沌雷达发射信号难以物理延迟、对多目标测距困难的问题。本文方法在 -10 dB 的信噪比环境下可以对多目标准确测距,为混沌雷达应用于实际工程提供了理论支持。考虑到实际雷达工作环境的信噪比往往低于 -20 dB,后续的研究工作可以结合文献[18]的噪声抑制算法,先通过抑制噪声来提高信噪比,然后再使用本文的方法得到目标的距离。

参考文献:

- [1] Carroll T L. Chaotic system for self-synchronizing doppler measurement[J]. Chaos, 2005, 15(1): 013109(1)-013109(5).
- [2] Narayanan M, Muhammad D. Doppler Estimation Using a Coherent Ultrawide-Band Random Noise Radar[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2000, 48(6): 868-878.
- [3] Venkatasubramanian V, Leung H. A novel chaos-based high-resolution imaging technique and its application to through-the-wall imaging[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(6): 528-531.

- [4] Kulpa K, Lukin K, Miceli W, et al. Signal Processing in Noise Radar Technology[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2008, 2(4): 229-232.
- [5] Carroll T. Chaotic systems that are robust to added noise [J]. Chaos, 2005, 15(1): 1-7.
- [6] Shi Z G, Qiao S, Chen K S. Ambiguity functions of direct chaotic radar employing microwave chaotic Colpitts oscillator[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2007, 77: 1-14.
- [7] Alonge F, Branciforte M, Motta F. A novel method of distance measurement based on pulse position modulation and synchronization of chaotic signals using ultrasonic radar systems [J]. IEEE Transactions on Instrument and Measurement, 2009, 58(2): 318-329.
- [8] Liu L D, Hu J F, He Z S. Chaotic signal reconstruction with application to noise radar system[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011, 1(2): 1-8.
- [9] Liu L D, Hu J F, He Z S. A Robust Controller for Synchronization of Chaotic System[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2011, 13(4): 354-358.
- [10] Liu L D, Hu J F, He Z S. A Velocity Measurement Method Based on Scaling Parameter Estimation of Chaotic System [J]. Metrology and Measurement System, 2011, 18(2): 275-282.
- [11] 魏恒东. 混沌遥测及其非合作信号检测与参数估计 [J]. 电讯技术, 2013, 53(6): 711-715.
WEI Hengdong. Chaotic Telemetry and its Non-cooperative Signal Detection and Parameters Estimation[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(6): 711-715. (in Chinese)
- [12] 刘立东, 宋焕生, 靳钊. 基于混沌同步的噪声鲁棒测距方法[J]. 电讯技术, 2014, 54(1): 46-51.
LIU Lidong, SONG Huansheng, JIN Zhao. A noise robust method of distance measurement based on chaotic synchronization[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(1): 46-51. (in Chinese)
- [13] Corron N, Hayes S, Pethel S. Chaos without nonlinear dynamics[J]. Physical Review Letters, 2006, 14(7): 1-4.
- [14] Corron N, Blakely J, Mark T. A matched filter for chaos [J]. Chaos, 2012, 22(2): 023123(1)-023123(10).
- [15] Corron N, Blakely J. Exact folded-band chaotic oscillator [J]. Chaos, 2012, 22(2): 023113(1)-023113(7).
- [16] Blakely J, Hash D, Corron N. Communication waveform properties of an exact folded-band [J]. Physica D, 2013, 263(8): 99-106.
- [17] Blakely J, Corron N. Ambiguity in range-Doppler determination using waveforms of a solvable chaotic oscillator [J]. Signal Processing, 2014, 104(3): 136-142.
- [18] Travassos X, Vieira D, Palade V. Noise Reduction in a Non-homogenous Ground Penetrating Radar Problem by Multi-objective Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(5): 1454-1457.

作者简介:



刘立东(1982—),男,河南新乡人,分别于2005年和2008年获西南交通大学自动化专业学士学位、控制理论与控制工程专业硕士学位,2012年于电子科技大学获信号与信息处理专业博士学位,现为博士后、讲师,主要研究方向为混沌信号处理和雷达信号处理;

LIU Lidong was born in Xinxiang, Henan Province, in 1982. He received the B. S. degree and the M. S. degree from Southwest Jiaotong University, the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2005, 2008 and 2012, respectively. He is now a lecturer. His research concerns radar signal processing and chaotic signal processing.

Email: liulidong_1982@126.com

宋焕生(1964—),男,1996年于西安交通大学获博士学位,现为长安大学信息工程学院教授,主要研究方向为非线性信号处理、数字图像处理和智能交通等。

SONG Huansheng was born in 1964. He received the Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1996. He is now a professor. His research concerns non-linear signal processing, digital image processing and intelligent transportation.

更正声明

本刊2015年第8期发表的论文《认知无线网络子空间映射频谱共享》(doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.08.001)英文摘要第一句中“analysis of”应去掉。特此更正。