

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.001

引用格式:余金峰,杨文革,李飞.一种利用混沌同步的测控系统测距方法[J].电讯技术,2015,55(7):713-717.[YU Jinfeng,YANG Wenge,LI Fei.A Ranging Method Based on Synchronization of Continuous Chaos Signals in TT&C Systems[J].Telecommunication Engineering,2015,55(7):713-717.]

一种利用混沌同步的测控系统测距方法^{*}

余金峰^{1,2,**},杨文革²,李 飞¹

(1. 洛阳电子装备试验中心,河南 洛阳 471003;2. 解放军装备学院 光电装备系,北京 101416)

摘 要:当前测控系统普遍采用的伪码测距体制中存在距离模糊问题和同步捕获问题,并且两者的性能要求是矛盾的。利用混沌信号的非周期、自同步和良好自相关特性,提出了将连续混沌信号作为测距信号应用于航天测控系统的方法,分析了该体制的工程应用可行性,并进行了仿真试验,给出了改进相关性能的方法。混沌测距方法相对于伪码测距的优势在于,混沌的同步特性能够自动实现测距信号的同步,省略了测距信号的捕获过程;混沌的非周期性消除了距离模糊。连续混沌信号在测控系统中的应用是可行且有优势的。

关键词:测控系统;测距;连续混沌信号;同步;洛伦兹系统

中图分类号:V556 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)07-0713-05

A Ranging Method Based on Synchronization of Continuous Chaos Signals in TT&C Systems

YU Jinfeng^{1,2},YANG Wenge¹,LI Fei¹

(1. Luoyang Electronical Equipment Test Center,Luoyang 471003,China;
2. Department of Optical and Electrical Equipment,The Academy of Equipment,Beijing 101416,China)

Abstract:The shortcomings of the pseudo code telemetry,tracking and command(TT&C) is discussed. There are range ambiguity and synchronization acquisition problems in pseudo code TT&C. The idea of applying continuous chaos signal to aerospace TT&C is proposed,moreover,the theoretical scheme is established and the merits of the proposed method are pointed out. Driven by the transmitted signal,the receiving terminal is automatically synchronized with the transmitting terminal with omitting the phase searching and acquiring progress in the pseudo-random code ranging. The aperiodicity of chaos signal solves the ambiguity problem in the pseudo-random code ranging. The analysis results show that the application of continuous chaos signal in TT&C systems is feasible and advantageous.

Key words:TT&C system;ranging;continuous chaos signal;synchronization;Lorenz's system

1 引 言

混沌现象是在非线性动态系统中出现的确定性的、类似随机的过程,这种过程既非周期,又不收敛,并且对初始值有极其敏感的依赖性^[1]。混沌信号的这些特性引起了人们极大的兴趣,在世界范围内掀起了研究热潮^[2]。

由于混沌信号具有非周期、连续宽频带、似噪声的特点,所以特别适用于保密通信、扩频通信等领域。在混沌应用研究中,混沌保密通信研究得最多、竞争也最为激烈,它已经成为保密通信的一个新的发展方向^[3]。混沌在保密通信中的常用方法有混沌掩盖^[4-6]、混沌键控^[7]、混沌参数调制^[8]。

^{*} 收稿日期:2015-03-12;修回日期:2015-06-02

Received date:2015-03-12;Revised date:2015-06-02

^{**} 通讯作者:yujinfeng2008@sohu.com

Corresponding author:yujinfeng2008@sohu.com

• 713 •

混沌信号是由确定性系统产生的类噪声信号,具有易于产生和控制等特点,在雷达领域同样引起了广泛关注。混沌理论在雷达波形设计、信号检测与估计、目标识别及杂波分析与建模等领域内得到广泛研究,并取得了一些突破性成果^[9]。

测控系统是数据传输系统与距离测量系统的综合体,是两种功能的综合应用,它融合了两个领域的理论和技术。因此,混沌信号在航天测控领域具有很大的应用潜力。

本文给出了一种在连续混沌信号同步基础上的测控系统测距方法。首先分析了测控系统距离测量的原理,指出了侧音测距和伪码测距方法存在的技术问题。在此基础上,以洛伦兹系统为对象,给出了利用混沌同步实现距离测量的方法。该方法相对于伪码测距的优势在于它消除了距离模糊,并自动实现测距信号的同步,省略了捕获过程。

2 测控系统现有测距信号及其不足

无线电测距的原理简单明了,测距系统的发射机发射一个设计适当的测距信号,合作目标对该信号进行接收并转发,接收机接收并恢复经过时间延迟了的测距信号回波,并从中提取发射与接收信号之间的相对时延,从而确定目标与测距系统之间的距离。

收发信号之间时间延迟的提取需要借助于相关函数的计算^[10]。为简单起见,假设合作目标没有运动,不存在由运动而产生的多普勒效应。设发射信号为 $s(t)$,发射信号经传播延迟 τ 后,接收端收到的信号为 $s(t-\tau)$ 。为估计 τ 值,计算两者的相关函数

$$R(\Delta\tau) = R(\hat{\tau}-\tau) = \int_0^{T_0} s(t-\tau)s(t-\hat{\tau})dt. \quad (1)$$

式中, $R(\Delta\tau)$ 为测距信号的相关函数, $\hat{\tau}$ 是接收端对 τ 的估计值, T_0 是积分时间。

当对信号时延估计正确时,相关函数有最大值;当时延估计有偏差时,相关函数应当快速下降,以便能够高精度地估计出时延值。

航天测控系统中,采用的测距信号一般有两种,一种是侧音测距信号,另一种是伪随机码测距信号。侧音测距时,测距精度与无模糊距离之间存在着矛盾,就是侧音频率越高,测距误差就越小;而侧音频率越低,无模糊距离越大。

伪码测距是主要的测距方式。伪随机码测距时,存在距离模糊和同步捕获问题。伪随机码的周期性会使得接收端不能判别真实距离,造成距离模糊。伪码的捕获是对本地码状态进行调整,缩小与

接收码的误差,捕获难度与伪码周期有关。伪随机码周期越长,无模糊距离越大,捕获难度越大。伪码越短,捕获难度越小,无模糊距离越小。无模糊距离要求伪码越长越好,而捕获性能要求伪码越短越好。所以,在伪码测距中,存在距离模糊问题和同步捕获问题,并且两者的性能要求是矛盾的。

3 基于混沌同步的距离测量方法

基于混沌同步的距离测量,以收发两端驱动系统和响应系统同步之后的同一状态变量或信号作为测距信号,具有其独有的特性。混沌信号的非周期性,也就是信号周期无限大,能够实现距离测量中的无模糊距离。混沌信号的自同步性,又能使信号的捕获跟踪操作简化,在驱动信号的作用下自动实现收发系统的同步。

下面以洛伦兹系统为例,计算混沌信号的时域波形、混沌吸引子和自相关函数的图形,讨论利用混沌信号进行测距的方法^[11]。

洛伦兹系统的微分方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \sigma(x_2 - x_1) \\ \dot{x}_2 = rx_1 - x_2 + x_1x_3 \\ \dot{x}_3 = x_1x_2 - bx_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $x = (x_1, x_2, x_3)$ 是状态变量, σ, r, b 是系统参数。

为了与电路系统的信号幅值范围相适应,柯莫和奥本海姆将信号幅度进行了变换^[12],并用电子线路实现了洛伦兹系统。实际电路的方程与上述方程相比,除了信号幅度的变化范围不同之外,还有一个时间尺度的变换^[13]。

令 $u = x_1/10, x_2 = y/10, x_3 = z/10$, 并取时间尺度变换因子 $\eta = 1/2505$, 经过幅度尺度变换和时间尺度变换的微分方程为

$$\begin{cases} \eta\dot{u} = \sigma(v-u) \\ \eta\dot{v} = ru - v + 20uw \\ \eta\dot{w} = 5uv - bw \end{cases} \quad (3)$$

方程中参数的取值要保证系统处于混沌状态,取 $\sigma = 16, r = 45.6, b = 4$ 满足要求。

以上述系统作为驱动系统,响应系统采用级联式全维响应系统,采用驱动-响应同步法实现两个系统的同步。

响应系统为

$$\begin{cases} \eta\dot{u}_r = \sigma(v_r - u_r) \\ \eta\dot{v}_r = ru - v_r + 20uw_r \\ \eta\dot{w}_r = 5uv_r - bw_r \end{cases} \quad (4)$$

将驱动系统的状态变量用 $d=(u,v,w)$ 表示,响应系统的状态变量用 $r=(u_r,v_r,w_r)$ 表示,两个系统状态变量的差值用 $e=(e_1,e_2,e_3)=(u-u_r,v-v_r,w-w_r)$,由驱动系统和响应系统方程可得误差系统为

$$\begin{cases} \eta \dot{e}_1 = \sigma(e_2 - e_1) \\ \eta \dot{e}_2 = -e_2 - 20u(t)e_3 \\ \eta \dot{e}_3 = 5u(t)e_2 - be_3 \end{cases} \quad (5)$$

考察如下形式的李雅普诺夫函数:

$$E = \frac{\eta}{2} \left(\frac{1}{\sigma} e_1^2 + e_2^2 + 4e_3^2 \right), \quad (6)$$

其随时间的变化率为

$$\dot{E} = \frac{1}{\sigma} e_1 \eta \dot{e}_1 + e_2 \eta \dot{e}_2 + 4e_3 \eta \dot{e}_3 = -\left(e_1 - \frac{1}{2}e_2\right)^2 - \frac{3}{4}e_2^2 - 4be_3^2. \quad (7)$$

由于 E 是正定的, $\dot{E}$ 是负定的,由李雅普诺夫定理可得误差系统是渐近稳定的, $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$ 。

4 仿真试验结果与分析

构建仿真系统,由仿真数据可以绘制混沌系统的奇怪吸引子。图 1 和图 2 分别是驱动系统的混沌吸引子在 uv 平面和在 uw 平面的投影。

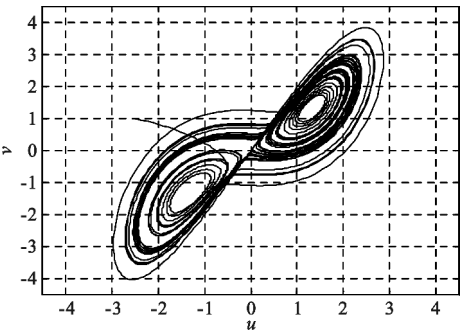


图 1 驱动系统混沌吸引子在 uv 平面的投影
Fig. 1 Projection of driving system chaotic attractor in uv plane

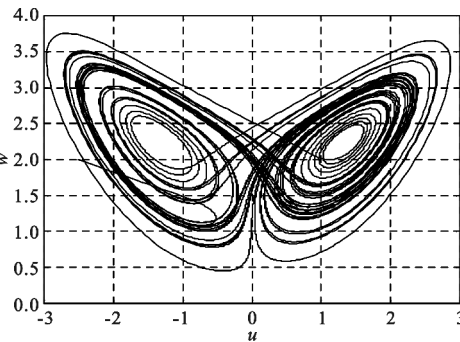


图 2 驱动系统混沌吸引子在 uw 平面的投影
Fig. 2 Projection of driving system chaotic attractor in uw plane

在驱动信号的作用下,响应系统也同步地绘制

出同样的吸引子。驱动信号 u 和响应系统同一分量 u_r 的差值变化如图 3 所示。

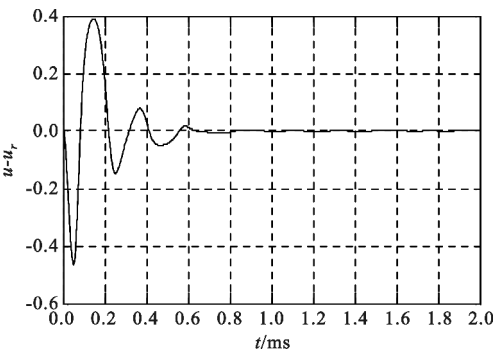


图 3 系统变量的同步误差 $(u-u_r)$ 曲线
Fig. 3 Synchronization error of system variable $(u-u_r)$

驱动信号的时域信号波形见图 4。

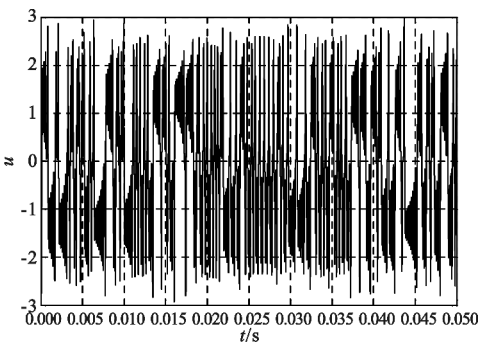


图 4 驱动信号 u 的时域图
Fig. 4 Waveform of driving signal u

用混沌信号进行距离测量,就是在发送端截取一段驱动信号,检测它在接收端出现时的时间延迟,也就是计算截取信号与接收端信号的互相关函数。由于响应系统与接收系统能够很快地同步,所以,也等效于计算信号的自相关函数。

截取驱动信号中 20 ~ 30 ms 之间的信号(见图 5),计算它与整个驱动信号的相关函数(见图 6 和图 7)。

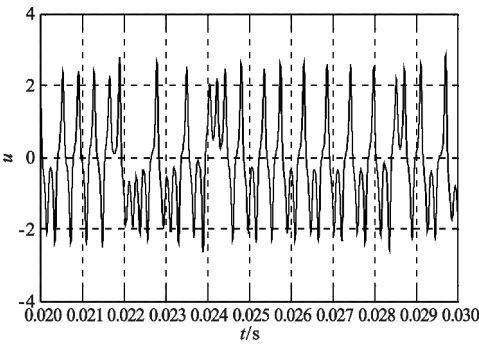


图 5 驱动信号中截取出的一段信号
Fig. 5 Intercepted signal from driving signal

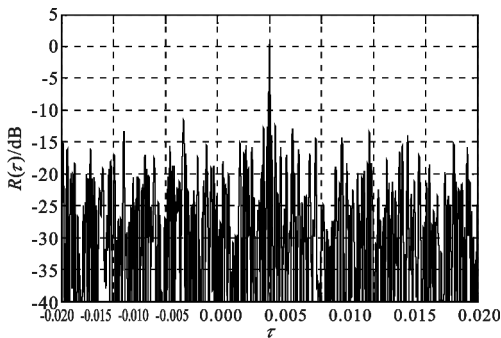


图 6 截取信号与接收端信号的互相关函数
Fig. 6 Cross-correlation function of intercepted signal and the receiving signal

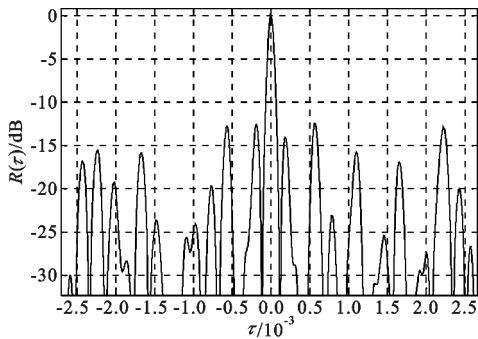


图 7 截取信号与接收端信号互相关函数的局部放大
Fig. 7 Partial enlarged view of cross-correlation function

由图 6 和图 7 的相关图可以看出,相关函数存在明显的主瓣,主瓣高度比最大旁瓣要高出 12 dB 以上,主瓣具有一定的宽度。

要改善相关函数主瓣的形状,可以提高混沌系统的基本振荡频率,也可以用混沌调频信号。混沌信号是非周期信号,当时间偏移不为 0 时,截取信号与接收信号总有误差,用混沌调频信号进行相关操作,相当于将信号幅度的差别扩大为信号频率的不同,相关函数会具有更好的形状,更接近 δ 函数。

5 关于混沌测距的讨论

5.1 混沌测距的优势

在伪码测距中,存在距离模糊问题和同步捕获问题,并且两者的性能要求是矛盾的。这两个问题在基于混沌同步的距离测量中得到了解决。

基于混沌同步的距离测量,以收发两端驱动系统和响应系统同步之后的同一状态变量或信号作为测距信号,表现出独有的特性。混沌信号的非周期性以及良好的自相关特性,使得参加相关积分的收端信号不会重复出现,消除了距离模糊问题。

对于同步问题,混沌信号不是像伪码那样从时间上进行状态调整,而是使幅度差异逐渐得到衰减,使信号的捕获跟踪操作简化,在驱动信号的作用下自动实现收发系统的同步,省去了测距码相位的搜索捕获步骤。

伪随机码捕获是受检测概率和虚警概率影响的随机过程,而混沌信号的同步过程是将差值直接进行衰减的确定性过程。

5.2 距离测量与数据传输的结合

只考虑基于混沌同步的测距不考虑数据传输问题时,收发两端之间的耦合信号是未经数据调制的,收端的混沌信号可以实现与发端信号的稳定同步。也就是说,当收发两端经过短暂的不同步过程后,就会一直在驱动信号的作用下保持同步状态。进行距离测量时,在发端可以任意截取一段信号,与收端的同步信号进行相关,当截取的这一段信号在收端出现时,相关运算得到最大值,就得到了这一段信号到达收端的时延。

当两端的耦合信号上同时还承载有数据信号时,发端的混沌信号一般是要根据数据信号的跳变而变化,这会使得收端的响应系统不断地改变自己的动态轨迹,不断地从与发端信号的不同步转变到同步。所以,这种情况下,响应系统总是经历着短暂的不同步到同步的过程。

利用这样的信号进行测距时,这部分的不同步区间会影响相关操作的积分结果,而数据调制对相关积分的影响更大。当参与相关操作的收端信号在积分区间内存在数据跳变时,就存在部分相同、部分相反的情况,积分结果会有抵消。所以,要在距离测量的同时完成数据传输,对同步方法还是要有选择。

6 结束语

本文分析了测控系统中伪码测距存在的不足,结合混沌信号的非周期特性、自同步特性和良好的自相关特性,提出了连续混沌信号应用于测控系统中的方法。将混沌信号应用于测控系统,可以省去测距码相位的搜索和捕获,自动获得测距信号的同步,还可以消除伪码测距存在的模糊问题。进一步,该方法可以与数据传输相结合,在测距的同时完成数据的传输,就有能力实现测控系统的两个核心功能。所以,利用连续混沌信号进行测距是有优势的,

混沌信号在测控系统中的应用是有潜力的。

参考文献:

- [1] Schuster H G. Deterministic chaos, an introduction[M]. 2nd ed. New York: Wiley Press, 1988: 37-69.
- [2] 刘宗华. 混沌动力学基础及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 3-4.
LIU Zonghua, Fundamentals and applications of chaotic dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 3-4. (in Chinese)
- [3] 方锦清. 混沌通信及其相关网络信息安全研究的若干进展[J]. 系统工程学报, 2010, 25(6): 725-741.
FANG Jinqing. Several advances in chaos-based communication and research of information security associated with networks[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(6): 725-741. (in Chinese)
- [4] Pecora L M. Chaos in communications[C]//Proceedings of 1993 SPIE. San Diego, California: IEEE, 1993: 2038-2044.
- [5] Short K M. Steps toward unmasking secure communications[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1994, 4(4): 959-977.
- [6] Short K M. Unmasking a modulated chaotic communication scheme[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1996, 6(2): 367-375.
- [7] Dedlieu H, Kennedy M P, Hasler M. Chaos shift keying: Modulation and demodulation of chaotic carrier using synchronizing Chua's circuits[J]. IEEE Transactions on Circuit&System(II), 1993, 40(10): 634-642.
- [8] Yang T. Recovery of digital signals from chaotic switching[J]. International Journal of Circuit Theory Application, 1995, 23(6): 611-615.
- [9] 朱丽莉, 张永顺, 王冲. 混沌理论与雷达技术发展[J]. 现代雷达, 2007, 29(1): 16-19.
ZHU Lili, ZHANG Yongshun, WANG Chong. Chaos Theory and Technology Development in Radar System[J]. Modern Radar, 2007, 29(1): 16-19. (in Chinese)
- [10] 周智敏, 陆必应, 宋千. 航天无线电测控原理与系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 82-83.
ZHOU Zhimin, LU Biying, SONG Qian. Space radio TT&C fundamental and system[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 82-83. (in Chinese)

- [11] Willsey M S, Cuomo K M, Oppenheim A V. Quasi-orthogonal wideband radar waveforms based on chaotic systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1974-1984.
- [12] Cuomo K M, Oppenheim A V. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications[J]. Physical Review Letters, 1993, 71(1): 65-68.
- [13] Cuomo K M, Oppenheim A V, Strogatz S H. Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1993, 40(10): 626-633.
- [14] 蒋飞, 刘中, 胡文, 等. 连续混沌调频雷达信号分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 559-563.
JIANG Fei, LIU Zhong, HU Wen, et al. Analyses of Continuous-Chaos Frequency-Modulating Signal of Radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(3): 559-563. (in Chinese)

作者简介:



余金峰(1969—), 男, 河南唐河人, 2011 年于国防科技大学获硕士学位, 现为高级工程师、博士研究生, 主要研究方向为航天器测量与控制;

YU Jinfeng was born in Tanghe, Henan Province, in 1969. He received the M. S. degree from National University of Defense Technology in 2011.

He is now a senior engineer and currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns spacecraft TT&C.

Email: yujinfeng2008@sohu.com

杨文革(1966—), 男, 江西金溪人, 2000 年于北京理工大学获博士学位, 现为教授、博士生导师, 主要研究方向为空间飞行器测控与通信系统、压缩感知理论;

YANG Wenge was born in Jinxi, Jiangxi Province, in 1966. He received the Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2000. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research interests include spacecraft TT&C and communication system, compressive sensing.

李飞(1979—), 男, 河南镇平人, 2014 年于电子科技大学获硕士学位, 现为工程师。

LI Fei was born in Zhenping, Henan Province, in 1979. He received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2014. He is now an engineer.