

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.11.004

应用于测控系统的混沌码产生与同步技术*

陈晓萍**,胡建平,刘嘉兴

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:为了将混沌码应用于测控系统中,提出了混沌码的产生和同步方式。分析表明,基于 DSP 处理的产生方式和时间信息引导的同步方式更加合理可行;考虑设备资源的制约性,同时有利于接收端的同步,采用混沌跳码也不失为一种可行的方式。

关键词:测控通信;混沌码;产生;同步

中图分类号:TN911;TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)11-1417-05

Generation and Synchronization of Chaotic Sequence Technique in TT&C System

CHEN Xiao-ping, HU Jian-ping, LIU Jia-xing

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

Abstract: For the application of chaotic sequence in TT&C system, the generation and synchronization method is proposed. Analysis shows greater feasibility is obtained by generating with DSP and synchronizing builded upon time compared with traditional method. In view of the restricted factor of resources and synchronization, jumping chaotic sequence is also feasible.

Key words: TT&C communication system; chaotic sequence; generation; synchronization

1 引言

测控通信系统在航天工程以及无人机系统中起着重要作用。飞行器测控系统主要完成对卫星、火箭、临近空间飞行器、无人机等空间飞行器的跟踪、测量和控制。随着空间探测与应用技术的发展,近些年来测控系统又兼容了数据传输功能,因而,测控与遥感接收、信息传输、侦察、精确打击武器制导与打击效果评估等空间飞行器的测控通信与应用系统具有了共同的构架,系统所采用的信号波形特性直接与测控信息传输性能以及系统抗干扰、抗截获能力密切相关。

随着非线性理论和混沌理论的不断成熟,利用混沌序列对初值的敏依赖性,可以提供数量众多、非相关、类噪声而又确定再生的信号^[1-6]。利用混沌码进行保密通信已经成为国内外通信领域的理论研

究和工程应用的热点^[3-4],并且已取得实际性进展。利用混沌码进行扩频测控也同样具有很大的优越性,但飞行器测控通信系统与单一的通信系统相比有其特殊性,对码的产生和同步有更高的要求^[2],对其码的产生和同步将会存在一定的制约因素。

在测控系统中对混沌码的应用可分为截短码(周期性码)与无限长码(即非周期性码)两种方式^[5-6]。截短码的产生与同步相对容易,但会损失一些混沌码的特性,无限长码的应用能够充分地体现出混沌码的良好抗截获性能,但在产生和同步实现技术上具有更大的难度。

本文对截短混沌码及非周期无限长混沌码的产生方式与测控工程中混沌码实现的制约因素进行了分析,针对非周期无限长混沌同步技术进行了初步讨论。

* 收稿日期:2013-08-15;修回日期:2013-10-17 Received date:2013-08-15;Revised date:2013-10-17

** 通讯作者:1098294228@qq.com Corresponding author:1098294228@qq.com

2 混沌码产生方式与测控工程中混沌码实现的制约因素

2.1 截短混沌码的产生方式与实现制约因素

混沌码通常是通过一个非线性方程进行无数次迭代运算来产生,截短码就是在多次迭代中,根据测控通信系统的实际需要,选取所需的序列长度完成截短处理。

最常用的混沌映射有 Chebyshev 混沌映射、Logistic 混沌映射、Tent 混沌映射和改进型 Logistic 混沌映射。

为保证混沌扩频系统性能,截短混沌序列优选需要从序列平衡性、自相关和互相关特性三方面考虑。序列平衡性决定扩频信号的频谱性能,与载波抑制制度存在密切的关系,序列不平衡会使扩频测控系统由于载波的泄露而降低其抗截获能力。自相关函数旁瓣最大值、自相关函数旁瓣均方根值和互相关函数最大值主要影响扩频测控系统的捕获虚警概率、捕获时间以及针对多径效应的分集接收性能;互相关函数的均方根值会影响到扩频测控系统的系统容量和多址用户误码率等统计特性。

因此,在构造、优选截短混沌扩频码时,需要从平衡性、自相关函数旁瓣最大值、自相关函数旁瓣均方根值、互相关函数最大值与互相关函数均方根值五方面因素来综合考虑^[7]。

在工程实现中,混沌序列产生有两种主要方式:一是监控注入迭代初值,利用处理器迭代运算实时产生;二是离线产生序列文件,通过监控程序调用载入 FPGA。

实时产生方式的特点在于监控程序设计简单,只需通过基带的 PCI 总线(或其他总线形式)将迭代初值置入 FPGA,序列生成运算完全由 FPGA 的乘法器、加法器完成。然而,受 FPGA 定点有限精度计算的影响,需要外部预先对 FPGA 生成序列的平衡性、相关性能重新做模拟评估;此外,实时产生混沌序列需要在 FPGA 中固化迭代生成运算公式,若更改其他迭代映射算法,需要在 FPGA 设计中包含迭代算法的实现或者重新配置 FPGA,在灵活性方面比离线生成方式弱。

离线产生方式是通过预先对混沌序列的平衡性、相关特性进行分析,得到序列库文件。在工作状态时,监控程序从库文件中选择所需序列通过 PCI 总线(或其他总线形式)注入 FPGA。与实时产生不同,离线方式利用 FPGA 中的 RAM 资源替代迭代计

算资源,重新配置的灵活性较优。

表 1 给出了在线与离线两种混沌序列产生实现方式的比较。

表 1 两种产生方式的比较
Table 1 The comparison between two methods

产生方式	FPGA 资源	序列长度与资源关系	序列相位表示	定点精度影响	实现灵活性
在线生成	乘法器、加法器	无	迭代次数	受影响	弱
离线生成	RAM	有	RAM 地址	不受影响	强

在实际工程中,采取离线生成方式来产生截短序列混沌码(假设长度为 1 023)的选择步骤如下。

首先要生成经过平衡性、自相关和互相关筛选后的截短混沌序列的离线文件。以非相参扩频模式为例:需要选出两个 chip 长度为 1 023 的截短混沌序列分别作为遥测支路和测距支路的扩频码。监控程序任意选择序号 i , i 对应于序列文件中的第 i 个 chip 长度为 1 023 的截短混沌序列,此序列作为其中一路扩频序列;在互相关均方根值表格中考察与序列 i 互相关均方根值最小的 m 个序列,得到序列序号,再在互相关最大值表格中寻找 m 个序列中与序列 i 互相关函数最大值最小的一个序列,从而得到第二路扩频序列。

图 1 给出了截短混沌序列数据注入处理流程。监控计算机向 DSP 发送序列数据,数据首先通过 PCI 总线传输至桥接芯片 PCI9656,PCI9656 将数据通过本地总线传入主控制 FPGA 的下行双口 RAM,数据经过主控制 FPGA 内的总线切换流向所对应的目标器件,DSP 将混沌扩频序列注入对应 FPGA 内部的双口 RAM,以备其他工作模块调用。

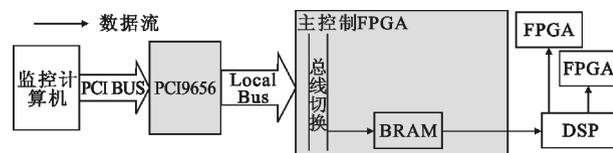


图 1 序列注入流程

Fig. 1 The process of sequence injection

完成注入后,DSP 将 FPGA 双口 RAM 中数据读回,通过主控制 FPGA 的上行双口 RAM 读回监控计算机,进行数据比对,如果比对不一致,则重新注入。

2.2 无限长非周期混沌码的产生方式与实现制约因素

对于无限长非周期混沌码, 序列生成不需要进行优选, 自相关、互相关特性与平衡特性等也已经不是设计考虑的主要因素。

考虑到硬件资源、非周期无限长混沌码特性等因素, 对于非周期无限长混沌码的实现, 不能像截短混沌码通过建立码库的方式离线产生, 只能采用监控注入迭代初值, 利用迭代运算实时产生的实现方式。迭代运算可以考虑通过监控单板计算机、DSP 或者 FPGA 3 种处理方式产生。

假定扩频 chip 速率为 10 Mchip/s, 则需要在 1 s 时间内完成 10^7 次迭代运算。表 2 给出了在此条件下 3 种实时产生非周期无限长混沌码方式的比较。

表 2 3 种方式的比较

Table 2 The comparison among three methods

产生方式	所需资源	资源是否独享	传输方式及是否需验证	计算精度	满足 chip 速率能力	灵活性
监控计算机生成	CPU Cycle	否	CPCI 总线与 DSP EMIF, 是	双精度浮点	弱	强
DSP 生成	DSP CPU 和 RAM	可选	DSP EMIF, 是	双精度浮点	中	强
FPGA 生成	Slice	是	不需要	有限长度定点	强	弱

由表 2 可以看出:

(1) 监控计算机生成的优势在于实现灵活, 只要给出初值与迭代公式即可计算得到混沌码, 迭代公式修改简单, 计算精度能够得到保证; 其劣势在于, 在生成非周期混沌码的同时, 监控计算机还需要响应其他各项监控处理指令的需求, 在 CPU 资源抢占过程中, 可能削弱相应混沌码生成的实时性, 因而满足 chip 速率的能力较弱, 而且迭代产生的码序列在传输到 FPGA 后需重传回监控计算机进行比对验证, 回路验证将占用 CPCI 总线 20 Mb/s 以上的吞吐率;

(2) DSP 生成的优势与监控计算机基本一致, 在传输方式上, DSP 生成方式缩短了码的传输距离, 不需占用 CPCI 总线传输吞吐量, 若利用单独 DSP 完成迭代运算, 则不需与其他功能抢占资源, 因而其满足 chip 速率的能力强于监控计算机生成方式;

(3) FPGA 生成方式的优势在于最接近于码的

应用, 不需要进行回路传输验证, 计算资源独立, 可支持的 chip 速率高, 缺点在于迭代计算仅能达到有限长度定点运算精度, 无法达到如监控计算机与 DSP 的双精度浮点数精度, 因而可能造成产生奇异点的频率高, 无周期性能减弱, 需要预先检验奇异点。

通过以上制约因素分析与产生方式的综合比较, 基于 DSP 处理的产生方式更加合理可行。

3 混沌码同步技术

混沌码同步技术是混沌码测控系统中的一个关键技术。对于截短混沌码, 鉴于其具有一定的周期特性, 其同步与 Gold 码同步相似, 即可采取传统的捕获算法, 包括串行、并行或并串结合几种快速捕获方式。对于无限长非周期混沌码, 有以下几种同步方式: 一是利用差分混沌键控实现无限长非周期混沌码同步; 二是利用周期发送初值相对偏移量实现同步; 三是利用时间同步信息辅助实现无限长非周期混沌码同步; 四是混沌跳码形成的近似无限长非周期混沌码^[6]的同步等。

可以看出, 无限长非周期混沌码的同步是与其码产生与发送方式密切相关的, 各种同步方式的主要特点如下。

(1) 利用差分混沌键控实现无限长非周期混沌码同步

差分混沌键控 (DCSK) 是由 G. Kolumbán 在 1996 年提出的一种具有稳健特性的非相干接收技术, 此后一种优化的频率调制 DCSK (FM-DCSK) 被提出。由于其原理简单, 便于分析和实现, 并且在多径信道中也有较好的稳健性, 因而引起了混沌通信研究人员的普遍关注。目前, 该技术已被列入欧盟委员会的长期研究计划。

DCSK 是一种具有两个基函数的数字调制方式, 这种调制方式的最大特点是基函数本身包含在一段重复传输的混沌波形中。通过基函数的传送, 差分混沌键控可以用一种简单的差分相干的相关接收技术进行解调, 不需要在本地通过混沌同步电路产生基函数的副本, 因而提高了其对噪声和干扰的抵抗能力。

DCSK 采用了易于实现的非相干解调, 是通信领域研究的热点, 对于测控系统而言, 往往要求能在低信噪比下工作, DCSK 的性能比传统的非相干 FSK 性能更差, 并且 DCSK 的能量并不守恒, 会带来额外的信噪比衰落。因此, 在测控领域, 不适合利用

差分混沌键控实现无限长非周期混沌码同步。

(2) 利用周期发送初值相对偏移量实现同步

由于混沌的映射关系及混沌迭代的初始值对于双方是已知的,发送端每隔一定的时间,将用于数据调制的混沌序列相对于初始值的迭代步数 K (为加强保密性,可经加密)传送到接收端,接收端以同一种混沌映射,同一个初值 x_0 进行混沌迭代,并计数迭代步数,当收到发送端传来的数据 K 时,将其与本地混沌产生器所计数的 K' 进行比较,就知道本地混沌序列的相位与接收混沌序列的相位差,从而加速(或减缓)本地混沌序列的迭代,使两者相位一致。最终达到相位的初始同步,再进入跟踪状态,使收发两端混沌序列相位完全一致。

由于迭代步数是经加密传输的,第三方不易破获此数据。退一步来讲,即使第三方破获了发送端传送的迭代步数,由于不知混沌产生的初始值,其保密性能与不知迭代步数是一样的。因此,不损害系统的安全保密及抗截获性能。这种方式的缺陷是传输迭代步数会占一定的信号功率,而且一旦被敌方干扰,会使得系统无法同步。

(3) 利用时间同步信息辅助实现无限长非周期混沌码同步

这种同步方式建立在两个先决条件的基础之上,一是收发端混沌码与时间信息建立一一对应关系,二是收发端时间的同步。

混沌码与时间信息建立一一对应关系后,会严格地按照时间输出,在相同的时间,收发端输出码相同。对于测控系统来说,时间同步是指通过星地时间同步系统或者地面授时等其他方式,使得卫星与地面的时间差被同步在一个很小的范围以内,由于非周期混沌码与时间相关,因此星地间混沌码片偏差可被限定在一定范围以内。若时间完全同步则混沌码码起止状态一致,则产生的非周期混沌码也一致。然而,由于星地间存在传播延迟、星地设备存在信号处理延迟,延迟随星地距离以及环境温度等因素不断变化,绝对精确的星地时间同步很难达到。时间同步的目的就是将星地的时间差限定在一个相对较小的范围内,为后续同步提供基础。因此,混沌码捕获仍然是码片相位时间不确定度与载波频率不确定度的二维搜索,可以采用基于时域频域混合的方法进行快捕算法的设计与实现。

无限长混沌码的非周期特性决定了其无法像 GPS 的 P 码与时间信息建立相对易于实现的对应映射关系。若要通过时间信息辅助实现同步,需要预

先将非周期混沌码相位与时间信息建立联系。由于非周期混沌码实时产生,利用 DSP 迭代运算,假定非周期混沌码 chip 速率为 10 Mchip/s,每秒钟需要完成 10^7 次迭代运算,一旦星地运算处理单元中的一方在运算过程中产生错误,运算的一致性遭到破坏后,星地之间的混沌码将再也无法同步。因此,必须在混沌码的生成过程中引入星地间的验证比对机制。

综合以上考虑,可采取预先迭代运算的非周期混沌码与时间信息建立关系的设计方法。

由于混沌码由非线性迭代运算产生,无法从当前时间直接运算得到混沌码,需要从某一预设时刻与该时刻迭代值并联合时间差对应的迭代运算次数获得当前时刻的迭代运算结果,从而得到当前时刻对应的混沌码相位,进而继续迭代得到后续混沌码。因此,需要对可能的时间信息进行分段,分段时间越短,则在捕获时所需高速产生混沌码的迭代次数越少,但需要预存的迭代值越多。

假定预先设定中间值的时间间隔为 1 s,中间值按双精度浮点数存储,则存储预先计算一天所需的中间值所需的存储资源为 1.4 MB,这是星载应答机与地面测控设备均能接受的。星载应答机与地面测控设备每天预先计算下一天的迭代中间值,并通过测控通道对计算迭代的下一天最后一个迭代运算值进行比对验证,以保证预先运算结果的一致性。

从抗侦收与系统鲁棒性角度考虑,基于时间信息引导的这种方式在当前器件以及技术水平条件下,是作为非周期无限长混沌码同步捕获的行之有效的方案。

(4) 混沌跳码形成的近似无限长非周期混沌码的同步

这种同步方式是基于一种近似无限长非周期的混沌码。

扩频信号发送端在发码钟的驱动下,循环地对多个不同的截短混沌序列(截短长度可相同也可不同)进行流水存储,每个存储单元存储一位码元,不同的截短混沌码采用一定的跳频图案控制选择采用时刻。一定数量的截短码经过这一跳码选择以及流水式存储发送后,就可构成在一定时间段内的“无限长”混沌码,如选用 20 个不同的截短混沌码进行全排列就可达到 10^7 年的周期长度,相对于几代人以及设备的使用寿命,可以看成是“无限”长的了。

为便于混沌序列的同步,设计混沌跳码序列的结构如图 2 所示。

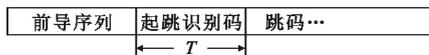


图 2 混沌序列结构

Fig. 2 The structure of chaotic sequence

用一个周期性的、不跳码的前导序列实现捕获, 捕获后再跳码; 在前导序列后紧接的一个特定混沌码作为“起跳开始标志”, 它是已知的, 可用相关接收解出; 发端控制跳码的开始, 收端接收到“起跳开始标志”后, 启动收端跳码, 其跳码规律与发端一致, 从而实现跳码后的同步; 收端的跳码产生器, 由接收端带有多普勒的钟频驱动。

4 结束语

为了采取混沌码实现测控信号的扩频以获得更好的抗干扰抗截获性能, 本文对截短以及无限长非周期混沌码的产生和同步进行了初步的研究, 给出了通过监控单板计算机、DSP 或者 FPGA 3 种处理方式产生混沌码的对比分析, 给出了多种针对无限长非周期混沌码的同步方式。研究表明, 基于 DSP 处理的无限长混沌码产生方式和基于时间信息引导的同步方式更加合理可行; 考虑设备资源的制约性, 同时有利于接收端的同步, 采用混沌跳码可以解决无限长码的产生需求与硬件资源的矛盾, 也不失为一种可行的方式。

参考文献:

- [1] 舒卫平, 王万斌. 混沌码作为测控扩频码的可行性研究[J]. 航天器工程, 2008, 17(4): 46-50.
SHU Wei-ping, WANG Wan-bin. Research on the Feasibility of Applying the Chaotic Code to the TT&C System as the Spread-spectrum Code[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(4): 46-50. (in Chinese)
- [2] 刘嘉兴, 文吉. Ka 频段混沌扩频测控系统设想[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)
- [3] 何世彪, 罗冬梅, 谷诚. 优化混沌扩频序列的抗干扰性能分析[J]. 计算机应用, 2010, 30(10): 2843-2849.
HE Shi-Biao, Luo Dong-mei, GU Cheng. Anti-jamming performance analysis of optimal chaotic spread spectrum

sequences[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(10): 2843-2849. (in Chinese)

- [4] 李辉, 张吏. 改进 DCSK 系统及其 DSP 实现[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010, 29(6): 788-792.
LI Hui, ZHANG Li. Improved DCSK system and DSP realization[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2010, 29(6): 788-792. (in Chinese)
- [5] 刘嘉兴. 飞行器测控通信工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
LIU Jia-xing. Spacecraft TT&C Communication Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [6] 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-xing. Spacecraft TT&C and Information Transmission Technology[M]. Beijing: National Defense Press, 2011. (in Chinese)
- [7] 黄展, 陈晓萍, 赵卫东. 截短混沌扩频序列的优选与性能分析[J]. 电讯技术, 2011, 51(2): 11-15.
HUANG Zhan, CHEN Xiao-ping, ZHAO Wei-dong. Optimized Selection of Truncating Chaotic Spread Spectrum Sequence and Performance Analysis[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(2): 11-15. (in Chinese)

作者简介:



陈晓萍(1971—), 女, 四川自贡人, 1993 年于四川大学获学士学位, 现为高级工程师, 主要研究方向为航天器测控通信技术;

CHEN Xiao-ping was born in Zigong, Sichuan Province, in 1971. She received the B. S. degree from Sichuan University in 1993. She is now a senior engineer. Her research concerns

spacecraft TT&C.

Email: 1098294228@qq.com

胡建平(1963—), 男, 四川人, 研究员, 主要从事航天测控通信系统总体工作;

HU Jian-ping was born in Sichuan Province, in 1963. He is now a senior engineer of professor. His research concerns space TT&C communication system.

刘嘉兴(1940—), 男, 重庆人, 研究员, “中国载人航天工程突出贡献者”奖章获得者, 主要研究方向为飞行器测控与信息传输技术。

LIU Jia-xing was born in Chongqing, in 1940. He is now a senior engineer of professor. He was the recipient of the Outstanding Contributor of China's Manned Space Project. His research concerns spacecraft TT&C and information transmission technology.