

基于再生伪码测距的复合码分析

彭保童 马宏 毛鑫峰

(中国人民解放军装备学院研究生管理大队 北京 101416)

摘要: 随着深空探测距离的延伸,对于航天器的测量显得尤为重要。其中,航天器相对于测量站之间距离的测量是深空探测中的重要一环。基于再生伪码测距的特点进行分析,介绍了伪码测距的发展历程,分析了再生伪码测距的优势,对再生伪码测距中采用的测距码的发展历程、码型选择进行了论述,对 Tausworthe 两种码在测距精度以及捕获时间上进行了分析,之后对码速率获取以及码捕获等方面进行了相关讨论,最后,对再生伪码测距中存在的问题进行了表述,点明了接下来的研究工作。

关键词: 深空;再生伪码测距;测距码

中图分类号: TN919 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Analysis of complex code based on regenerated pseudo-code ranging

Peng Baotong Ma Hong Mao Xinfeng

(Department of Equipment Acquisition of PLA, Beijing 101416, China)

Abstract: With the extension of the deep space detection, the measurement of spacecraft is particularly important. The measurement of the distance between the spacecraft and the measuring station is an important part of the deep space detection. This paper is based on the characteristics of regenerative pseudo code ranging, and the paper introduces the development history of pseudo-code ranging, analyzes the advantages of regenerative pseudo-code ranging, discusses the development process and pattern selection of the distance code used in regenerative pseudo-code ranging, and Tausworthe for two yards in the ranging accuracy and capture time were analyzed, then the speed rate acquisition and the code acquisition are also discussed. Finally, the existing problems in the reconstructed pseudo-code ranging are described, and the next research work is pointed out.

Keywords: deep space; regenerative PN ranging; ranging code

0 引言

深空测距的目的是确定地球和航天器之间的距离。测量的距离在数百万公里的量级上,具有 m 级的精度。同时,测距是在深空探索中对航天器进行无线电测定的两种最重要的技术之一,另一种是进行多普勒测量。两种类型的测量均使用上行链路和下行链路,在航天器上有对载波进行相干转发的转发器,其目的是实现最佳的测量精度。另外,测距还要求将专门设计的信号调制到载波上,并且该测距信号也必须由航天器转发才能实现测距功能^[1]。

本质上,测距是对测距信号在地面设备与航天器之间的往返光时间(RTLT)的测量,通过将已知序列(测距信号或测距码)调制到上行链路载波上来完成。航天器接收机跟踪锁定载波,解调测距信号,并将其重新调制到与上行链路载波相干相关的下行链路载波上。上行链路和下行链路

载波之间的比率称为周转比。地面上的接收设备跟踪锁定下行链路载波并解调出测距信号。

在传统的测距系统中,例如侧音测距,目标航天器对测距信号只进行相位的解调和载波的再调制。然而,测距信号的直接转发或重新发射会造成测距信噪比的降低,这是因为上行链路中的噪声被调制到下行链路的载波上,从而带来一定的路径损耗,噪声功率可能比测距功率要大,这种情况下,测距精度大大降低。

1 再生伪码测距发展

在美国航空航天局的前期设计中,采用的测距码结构为 PN 单码,它通过提高码长来保证解模糊能力,通过减小码元宽度来提高测距的精度。但是,码长长度的增加使得测距码捕获时间变长,因此需要一种新的测距码来平衡解模糊能力与捕获效率^[2]。

为解决上述矛盾,在单码测距的基础上提出了复合码测距技术。复合码通过数个码以一定的逻辑方式组合而成,其周期为各子码周期的乘积,足够的码长实现了解模糊能力的提高。1963 年, Tisworth 对子码的选择进行了研究,但是在 Tisworth 的研究中,并没有对各子码必须互质这一条件进行强调。

同时,在 1973 年前后,喷气推进实验室(JPL)通过将二进制时钟和伪噪声序列以逻辑组合的方式产生上行链路测距码,并在行星以及月球航天器的测距系统中得到应用。其中 NASA 在阿波罗号宇宙飞船登月过程中就采用了复合码测距的测距系统,其测距复合伪码由几个互质的子码经过一定的逻辑方式组合而成,逻辑运算包括逻辑和(AND),逻辑或(OR),逻辑异或(XOR)和多数和(MAJ),不管操作如何,所得序列的周期等于所有子序列长度的乘积^[3]。

为了更大程度的消除噪声误差,在复合码测距的基础上,提出了再生伪码测距的思想,为深空测距开辟了新的思路。同时,为了规范再生伪码测距的技术标准,CCSDS 对再生伪码测距进行了全面的技术分析,并于 2008 年 8 月发布了伪码测距的红皮书(建议书草稿),于 2009 年 3 月发布了伪码测距的蓝皮书(正式建议书),于 2010 年 3 月发布了伪码测距绿皮书(技术原理报告)^[4]。CCSDS 发布的这些公告书规定了再生伪码测距的技术要求,制订了再生伪码测距的标准,其中包括测距码的选择、码跟踪环的实现方式等^[5]。同时,再生模式深空测控应答机已经在美欧深空探测任务中得到应用,典型任务就是 NASA 的“新地平线”冥王星探测任务和 ESA 的 BepiColombo 水星探测任务^[6]。

2 再生伪码测距特点

深空探测的一个关键任务就是确定航天器相对于地面测量站的位置。度量数据是确定航天器位置的重要信息。度量数据包括两种主要类型:多普勒数据和测距数据。

多普勒数据是由于航天器的运动造成接收信号相位的变化,并且可以通过检测接收信号的相位来获取。测距信息是通过将已知信号调制到上行链路上,航天器接收后并将测距信号重新调制在下行链路上,地面测控站通过检测测距信号的往返时间来获取测距数据。

与多普勒数据不同的是,测距信号减少了可用于其他调制信号的功率:上行链路中的遥控数据信号以及下行链路的遥测数据信号。同时,当测距信号经下行链路传输至地面站的过程中,上行链路的噪声同样被调制到下行链路载波上,这种情况进一步减少了可用于遥测数据的功率,同时也降低了测距信号的功率。对于典型的深空测距来说,重传过程中的噪声功率比测距功率大 30~40 dB,这就浪费了非常有限的航天器的传输功率资源。

在传统的测距方式中,如侧音测距,为了实现超远距离的解模糊,需要增加侧音的数量,侧音数量越多,解模糊能

力越好。但是解模糊信号的数目越多,测距信号捕获的时间加长。同时,测距信号的捕获需要知道测距序列的起始时间。

再生伪码测距采用的复合码的周期为逻辑组合成的所有子码序列的长度的乘积,码长可达百万级,因此,再生伪码测距的解模糊能力较好;同时,再生测距系统中的接收机采用并行捕获的方式,捕获时间为最长子码的捕获时间,相比单码测距的捕获时间大大减少。

再生伪码测距通过在航天器上重新生成与地面发射的测距信号完全一致的伪码测距信号,并将此伪码测距信号通过调相的方式调制到下行载波中。再生伪码测距由于实现了伪码测距信号的再生,在很大程度上可以消除上行链路中引入的噪声。因此,根据信号强度的不同,伪码测距信号再生的方法最高可以将下行链路中的测距信号的信噪比提高到 30 dB。这种下行链路信号强度的增益可以通过 3 种方式改善测距性能。首先,积分时间和下行链路测距调制指数不变的情况下,可以减小测量误差。第二个选择是增加遥测调制指数,为遥测信号提供更多的功率。最后一个选择是减少积分时间,允许在较少的跟踪时间内实现相同的测量误差^[7]。另外,再生伪码测距不需要知道测距序列的开始时间,能够在序列中的任何地方开始捕获是再生伪码测距最大的优势。

3 PN 测距码

3.1 不同测距码分析

PN 测距序列由循环重复的不同长度的二进制序列(探测序列或分量代码)逻辑组合生成。组成复合码的 6 个子码的长度分别为 2、7、11、15、19 和 23^[8],如图 1 所示。

$$\begin{aligned} C_1 &= +1, -1 \\ C_2 &= +1, +1, +1, -1, -1, +1, -1 \\ C_3 &= +1, +1, +1, -1, -1, -1, +1, -1, +1, -1 \\ C_4 &= +1, +1, +1, +1, -1, -1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1 \\ C_5 &= +1, +1, +1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, -1, +1, +1, -1, +1, -1, -1 \\ C_6 &= +1, +1, +1, +1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, -1, -1, -1 \end{aligned}$$

图 1 6 个子码序列

NASA 提出的原始 Tausworthe 序列的组合逻辑基于以下规则:测距序列码片是 +1 并且仅当 C_1 在该位置处具有 +1 或者序列 C_2, C_3, C_4, C_5 和 C_6 在该位置具有 +1, 或两种情况全都具备。使用相同的子码,原始的 Tausworthe 方案可以通过以下公式扩展产生新的测距复合码:

$$C = \text{sign}(0.5 + v \times C_1 + C_2 + C_5 + \alpha \times (C_3 + C_4 + C_6)) \quad (1)$$

式中: v 是时钟投票,具有 +1 或 -1 值。原始的 Tausworthe 复合码中 $v = 5, \alpha = 1$ 。参数 v 给出控制时钟相对于其他分码的相对功率的可能性;通过设置参数可以来平衡整个 PN 序列,即减少直流分量。

在 CCSDS 的建议书中,对 Tausworthe 测距码进行了

改进。在原有6个子码的基础上,通过减少逻辑公式中的常数项得到新的 Tausworthe 测距码逻辑组合公式:

$$C = \text{sign}(v \times C_1 + C_2 + C_5 + \alpha \times (C_3 + C_4 + C_6)) \quad (2)$$

式中: $v = 2, v = 4, \alpha = 1$ 时可以得到加权 Tausworthe 序列 T2 码和 T4 码; $v = 2, v = 4, \alpha = -1$ 时可以得到它们的平衡版本 T2B 码和 T4B 码^[9]。

同时,逻辑组合方式的不同,可以构成 JPL1999 系列测距码,其组合方式如式(3)所示。

$$C = C_1 \cup (C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6) \quad (3)$$

3.2 Tausworthe 码

对于 $v = 2, v = 4$ 的加权 Tausworthe 测距码方案,测距时钟和测距序列之间的强相关性将有助于接收器锁定测距信号时钟。对于 Tausworthe 测距码,可以对其进行滤波成型,主要为方波成型与半正弦整型,通过对测距码整型可以改善频谱效率。其中半正弦成型较方波成型,信号的频谱旁瓣衰减大,可以更好地保护系统的带宽。在使用半正弦整型时,如果接收机滤波器保持矩形脉冲响应,则存在由于失配而引起的损耗,这种损耗一般小于 0.85 dB。

利用 Simulink 对 T2B 以及 T4B 码进行仿真,其仿真原理如图 2 所示。通过循环移位寄存器可以实现各个子码的仿真,移位寄存器的输出通过逻辑组合模块实现 6 个子码组合成 T2B 码以及 T4B 码。

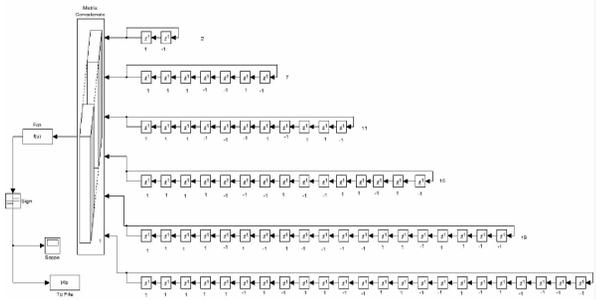


图 2 Tausworthe 测距码仿真图

由于生成 T4B 码和 T2B 码的 6 个子码互质,因此,复合码的周期为子码长度的乘积,同时,由于两种码的子码相同,所以 T4B 码和 T2B 码的周期长度为:

$$L = 2 \times 7 \times 11 \times 15 \times 19 \times 23 = 1\ 009\ 470 \quad (4)$$

在两种码序列中-1 和+1 数目的不平衡性会导致伪码频谱中产生直流(DC)分量,而直流分量不能用于测距,因此,复合码中的不平衡性应该越小越好。根据 CCSDS 的标准,表 1 中给出了两种码的不平衡度。

根据表中数据,可以看出,T4B 码的直流分量相对于 T2B 码要小的多,因此,T4B 码的不平衡性要优于 T2B 码如图 3 所示。

通过逻辑组合公式分析,可以看出 T4B 码中 C_1 子码

表 1 码不平衡度

码型	周期长度	+1 数目	+1 最长连续数目	-1 数目	-1 最长连续数目	不平衡度	直流
T4B	1 009 470	504 583	7	504 887	5	304	3.01×10^{-4}
T2B	1 009 470	504 033	9	505 437	9	1 404	1.39×10^{-3}

的权重为 4,因此 T4B 码有更强的测距时钟分量,并且将以稍长的捕获时间为代价提供更大的测距精度。因此,T4B 码应该用于测距精度是主要关注的测距系统,例如用于无线电科学。

快的捕获时间。T2B 码应该用于采集时间是主要关注的测距系统,例如,在预期测距 SNR 非常低的任务中。

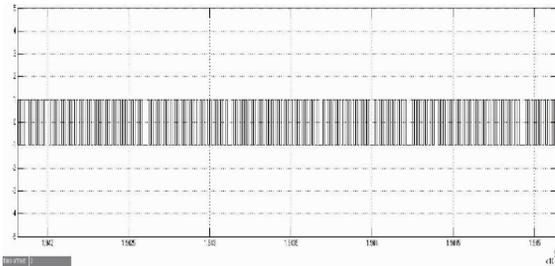


图 3 T4B 码仿真

$v = 2$ 时的加权平衡 Tausworthe 码简称为 T2B,仿真结果如图 4 所示。该代码相对于其他组件具有较弱的测距时钟分量,并且将以测距测量中的较大抖动为代价具有较

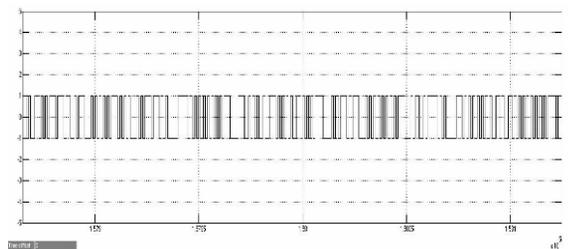


图 4 T2B 码仿真

通过对两种测距码进行仿真,观察两种测距码的频谱,如图 5、6 所示。由于 T4B 的码钟序列时钟码的权重是 T2B 的两倍,通过比较 T2B 和 T4B 的频谱可以发现,T4B 码的尖峰比 T2B 码更大,因此 T4B 的码钟分量的功率更大。

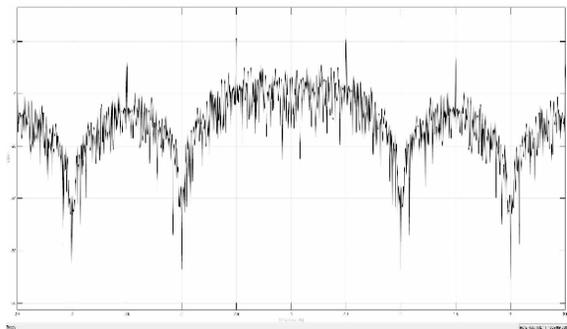


图 5 T2B 码频谱

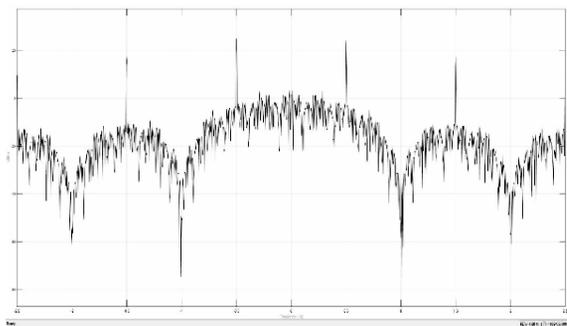


图 6 T4B 码频谱

4 码速率

测距码采用线性调制的方式调制到上行载波中,高码速率的复合码测距信号需要进行基带滤波,保证信号的有效带宽。测距信号的码速率应该与上行载波的频率相关,同时也与采用载波的频段有关。

在采用 S 频段时,码速率可以定义为:

$$F_{S\text{-chip}} = 2f_{\text{clock}} = \frac{L \cdot f_{S\text{-band}}}{128 \cdot 2^n} \quad (5)$$

在采用 X 频段时,码速率可以定义为:

$$F_{X\text{-chip}} = 2f_{\text{clock}} = \frac{221}{749} \cdot \frac{L \cdot f_{X\text{-band}}}{128 \cdot 2^n} \quad (6)$$

在采用 Ka 频段时,码速率可以定义为:

$$F_{Ka\text{-chip}} = 2f_{\text{clock}} = \frac{L \cdot f_{Ka\text{-band}}}{128 \cdot 2^n} \cdot \frac{221}{3599} \quad (7)$$

上述公式中, $n=6$ 时, $L=2^k, 0 \leq k \leq 6, k$ 为整数;或者 $L=2$ 时, n 取值为 8、9、10。 $F_{S\text{-chip}}, F_{X\text{-chip}}, F_{Ka\text{-chip}}$ 分别为 S/X/Ka 频段下的单位的码速率(Mchip/s); f_{clock} 为测距时钟频率(MHz); $f_{S\text{-band}}, f_{X\text{-band}}, f_{Ka\text{-band}}$ 分别为 S/X/Ka 频段上行载波频率(MHz)^[10]。

同时为了更好的协同工作,码速率最少需要满足两种取值: $L=8, n=6$ 时的码速率值约为 2 Mchip/s; $L=4, n=6$ 时的码速率值约为 1 Mchip/s^[11]。

值得一提的是,当测距信号在低信噪比情况下,码速率的获取比较困难,因此,可以通过载波频率计算得出较高精

度码速率值^[4]。

5 测距码同步

再生伪码测距最主要的功能是实现伪码的再生,实现测距码的捕获是伪码再生的首要条件,测距码捕获首先要实现码片的捕获,Tausworthe 码中包含了 1 个时钟码,存在显著的码钟分量,因此在进行测距码同步时可以首先跟踪解调测距码中的时钟分量,实现码片同步,即使接收伪码的钟码和本地伪码的钟码初始相位一致,然后再进行其余子序列的同步,这些功能主要在码跟踪环(chip tracking loop, CTL)中实现^[12]。码跟踪环完成对接收到的测距码信号中时钟码的捕获和跟踪,即实现码元的初始相位的捕获。

时钟码捕获后,需要对其他子码进行捕获,复合码由 6 个子码组合而成,子码一共有 77 个相位,要完成码相位的同步,只需完成对 6 个子码的捕获,找到各自子码的相位。这个工作由子码相关器组来完成^[13]。由于再生伪码测距采用串并行捕获的方法,即码间并行捕获,码内串行捕获^[14]。其中,航天器上采用 6 个相关器组并行捕获,地面站采用 76 个相关器组并行捕获^[15],因此,地面站相比航天器上的捕获时间要短得多。

码跟踪环输出的恢复时钟驱动子码生成器恢复各子码序列,接收的码序列分别与本地生成的 6 个子码序列做相关,经过多次相位累加,输出值经过最大值检测,确定本条子码最大值对应的相位,然后输出这 6 个实时的相位值,即可求出复合码的相位^[16]。

当本地子码序列与接收码序列实现同步后,6 个子码序列被送到码组合模块,下行码组合器将再生的子码组合成再生的复合码,并送到下行调制单元,实现伪码再生^[17]。

6 结 论

再生伪码测距的发展有效缓解了传统测距意义上的难题,在保证捕获时间的性能下,能够在低信噪比条件下实现高精度测距测量,为向更远的空间探测提供了可能。

再生伪码测距复合码的选择尤为重要,T4B 和 T2B 码在捕获时间以及测距精度上各有侧重,因此测距码的分析对于再生伪码测距性能的提升至关重要,在实现捕获时间与测距精度兼容性方面需要更大努力。

在码的串行搜索捕获中,滑动相关法的相关器简单,应用广,缺点是当两个 PN 码的时间差或相位差较大时,相对滑动速度较慢,特别是对长 PN 码的捕获时间过长,而影响通信的质量。

在码的并行捕获中采用相关器并行处理,基于最大搜索的算法给出了伪码信号捕获的最优算法。然而,该算法存在一个限制:没有有用输入信号的情况下,它也会给出一个最大值。伪码捕获是在码跟踪环(CTL)锁定后执行的,但是一个错误的 CTL 锁定会带来一个错误的伪码

捕获。

基于以上问题,在今后研究工作中还要进行相关工作,提高相关功能。

参考文献

- [1] 涂宜锋,吴潜,张旭. 航天器再生伪码测距体制分析[J]. 飞行器测控学报, 2011(S1): 68-73.
- [2] BERNER J B, LAYLAND J M, KINMAN P W, et al. Regenerative pseudo-noise ranging for deep-space applications [J]. Telecommunications & Mission Operations Progress Report, 1999 (137): 42-137.
- [3] TAUSWORTHE R C. Tau ranging revisited[J]. In its The Telecommunications and Data Acquisition Report, 1990(91):318-324.
- [4] 崔永全,田增山. 深空伪码测距前向信号捕获算法研究与仿真[J]. 科学技术与工程, 2014(3): 179-182.
- [5] 丁溯泉,房鸿瑞. 伪码测距在深空探测任务中的应用[J]. 遥测遥控, 2012, 33(3):1-5.
- [6] 于志坚,于益农,董光亮,等. 欧空局深空网的现状和发展趋势[J]. 飞行器测控学报, 2004, 23(4): 1-6.
- [7] 唐格实. 深空测控无线电测量技术[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [8] 柏翰. 基于CCSDS的深空测控伪码同步技术研究与硬件实现[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- [9] BOSCAGLI G, HOLSTERS P, VASSALLO E, et al. PN Regenerative ranging and its compatibility

with telecommand and telemetry signals [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(11):2224-2234.

- [10] 李海涛,冯桂年,朱智勇,等. 深空测控应答机技术[M]. 北京:清华大学出版社,2014.
- [11] 王向晖,王鹏,王新梅. 复合测距伪随机码的选择[J]. 通信技术, 2003(11):3-5.
- [12] 金小军. 再生伪码测距技术及实现研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
- [13] 高阳. 深空 Tausworthe 码测距的研究与实现[D]. 北京:中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2011.
- [14] 刘晗超,简伟,侯建文. 再生伪码测距中的码跟踪环实现[J]. 时间频率学报, 2014(2):104-110.
- [15] 丁溯泉,李海涛. CCSDS 建议的再生伪码测距性能分析[J]. 宇航学报, 2011, 32(10):2242-2248.
- [16] 韩磊,程乃平,倪淑燕. 扩频测距中码钟采样对距离分辨率的影响[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3): 107-111.
- [17] 陈略,唐歌实,韩松涛,等. 深空测控再生伪码测距技术研究[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(3): 11-15.

作者简介

彭保童,1992年出生,工学硕士,主要研究方向为通信与信息系统

E-mail:13810479417@163.com