

基于循环冗余校验码的卫星导航 电文增强纠错方案

朱建锋¹, 安建平¹, 汪思为²

(1. 北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081; 2. 清华大学 交叉信息研究院, 北京 100084)

摘要: 为使用错误导航电文改善卫星导航性能, 提出一种基于循环冗余校验码的增强纠错方法. 使用 CRC-24 检错编码纠正卫星导航电文中的 1 bit 错误模式, 利用数学分析和计算机搜索方法证明了最小码重和纠正错误能力, 基于电文格式和错误比特分布模型分析了增强纠错方案对导航电文的改善, 给出了一种低复杂度查表实现. 以 GPS CNAV 电文数据为实例验证增强纠错方法的性能, 结果表明导航接收机使用 CRC 辅助纠错可以降低导航电文的帧错误率 1~2 个数量级, 增强纠错在不改变信号结构的条件下可改善导航数据可靠性.

关键词: 卫星导航电文; 增强纠错方法; 循环冗余校验码; 1 bit 错误模式; 帧错误率

中图分类号: TN 967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2014)07-0748-04

Enhanced Error Correction for Satellite Navigation Message Based on CRC Codes

ZHU Jian-feng¹, AN Jian-ping¹, WANG Si-wei²

(1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute for Interdisciplinary Information Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To improve the performance of satellite navigation by using error messages, an enhanced error correcting method based on CRC code was proposed. The CRC-24 error checking code of navigation message was used to correct one-bit error pattern. The minimum hamming weight and error correcting capability of CRC-24 code were proved by mathematical analysis and computer searching. The performance improvement of navigation using CRC correction was analyzed based on message format and the model of error bit distribution. A low complexity implementation was schemed based on looking-up table. The performance of enhanced error correcting was simulated with GPS CNAV navigation message. The results show that the CRC-assisted correction can reduce frame error ratio by 1~2 orders of magnitude. Without changing the signal structure of navigation message, the reliability of navigation is improved by using the enhanced correction.

Key words: satellite navigation message; enhanced error correcting; cyclic redundancy check code; one bit error pattern; frame error ratio

在卫星导航系统中正确的导航电文是实现定位解算的基础, 因此需要使用检错编码对电文的正确

性进行检查. 早期的卫星导航电文如 GPS NAV 电文、GLONASS 导航电文使用汉明码作为检错编

码,现代化的导航电文通常使用检错性能更优的循环冗余校验码 CRC 作为检错编码。在导航接收机中,CRC 校验错误的帧通常直接丢弃不用于定位解算,在弱信号或高动态条件下高误码率会造成大量电文错误和被丢弃,可用导航电文不足可能会导致定位解算无法进行从而失去导航的连续性。

循环冗余校验码作为一种高性能、低复杂度的检错编码广泛应用于数据通信系统。检错性能是 CRC 码的主要评价指标,对于 CRC 码的检错能力和构造方法已经进行了广泛的理论研究和验证^[1-2]。文献[3]中将无线传输中的 CRC 码的应用扩展到纠错用途,提出了一种使用 16 位的 CRC-CCITT 纠正数据中的 1 bit 错误的方法。文献[4]中将 CRC 码纠错应用于 PHS 移动通信系统,并给出了基于渐进编码增益评估的编码增益。

本文提出一种基于 CRC 纠错码的卫星导航电文增强纠错方案,通过理论分析和仿真验证表明新方案可以有效降低导航电文的帧错误率,提高电文数据可靠性和有效电文比率,从而提高导航接收机在弱信号条件下的导航连续性,增强纠错方法适用于任意使用 CRC 码检错的卫星导航系统。

1 导航电文结构和错误分布模型

1.1 卫星导航电文结构

现代化的卫星导航系统如 GPS 系统、欧盟 Galileo 系统和中国的北斗 Compass 系统在信号体制上新增加了很多创新技术,导航电文设计引入了新的检错编码和纠错编码方案^[5]。GPS 系统 L2C 和 L5 信号引入了 CNAV 电文格式,L1C 信号引入了 CNAV-2 电文格式,欧洲 Galileo 卫星导航系统引入了 I/NAV 和 F/NAV 电文格式,这些电文都使用了 24 bit 的 CRC-24 检错码,中国北斗一号卫星导航系统的 RDSS 信号则使用 16 bit CRC-CCITT 检错码^[6]。典型现代化的导航电文信号结构参数如表 1 所示。

表 1 现代化卫星导航电文结构参数

Tab. 1 Structure parameters of modern navigation messages

导航电文	帧长	检错码
GPS CNAV	300	CRC-24
GPS CNAV-2	600/274	CRC-24
GPS WAAS	250	CRC-24
Galileo F/NAV	244	CRC-24
Galileo I/NAV	120	CRC-24
BeiDou 1 RDSS	250	CRC-CCITT

表 1 中的导航电文结构参数表明:循环冗余校验码是目前主流的卫星导航电文检错码方案,代表了导航电文设计的发展方向,因此使用循环冗余校验码进行导航电文增强纠错具有广泛的应用前景。

1.2 导航电文的错误分布模型

卫星导航电文以帧作为信息传输单位,在导航信号结构设计和性能评估中采用误帧率 (frame error ratio, FER) 或者误字率 (word error ratio, WER) 作为评价准则,误帧率代表了有效可用电文的比例。GPS L1C 信号的性能要求是 WER 优于 0.030^[7],GPS L2C 信号的性能要求是 WER 优于 0.015^[8]。实际应用中 FER 或 WER 与信号结构、信道模型、调制方式、信道编码等多种因素有关,本文简化信道模型为典型加性高斯白噪声信道。

设定导航电文外层纠错码(例如卷积码)纠错后的误码率为 p ,电文帧长为 N bit,校验位 24 bit,据此设定信道模型如下:

电文不发生错误的概率为 $(1-p)^N$,则误帧率 FER 为

$$P_e = 1 - (1-p)^N. \quad (1)$$

分析 1 bit 错误模式,1 bit 错误模式发生的概率为

$$P_{e1} = C_N^1 p (1-p)^{N-1} = Np(1-p)^{N-1}. \quad (2)$$

则 1 bit 错误模式在总的错误电文中的比率为

$$R = P_{e1}/P_e \times 100\% = \frac{Np(1-p)^{N-1}}{1-(1-p)^N} \times 100\%. \quad (3)$$

选择 $N = 300$ bit 作为电文长度,对误码率 p 从 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ 进行计算,结果如表 2 所示。

表 2 导航电文的 1 bit 错误模式分布

Tab. 2 1 bit error pattern distribution of navigation messages

p	P_e	P_{e1}	$R/\%$
10^{-2}	0.950 9	0.148 6	15.62
10^{-3}	0.259 3	0.222 4	85.78
10^{-4}	2.955×10^{-2}	2.911×10^{-2}	98.51
10^{-5}	2.995×10^{-3}	2.991×10^{-3}	99.85
10^{-6}	2.999×10^{-4}	2.999×10^{-4}	99.98

表 2 中的数据结果和理论分析表明导航电文中的错误分布具有下列特点:

① 帧错误概率随着误码率 p 的增加而增加,在帧长固定的条件下,在 Np 接近 1 时电文错误的概率很高,大部分导航电文属于无效电文;

② 对于典型的卫星导航电文中,当 $Np < 1$ 时

1 bit 错误模式是最主要的错误模式,纠正 1 bit 错误可以有效降低电文的误帧率.

2 导航电文增强纠错原理和实现

2.1 使用 CRC 编码增强纠错的原理

为将导航电文中 CRC 检错编码用于增强纠错,需要对 CRC 编码的纠错能力进行证明. 设定分析过程使用符号及其含义定义如下.

$g(x)$ 为 CRC-24 生成多项式,最高项次数 $r=24$, $g(x)$ 的周期为 8 388 607;

$$g(x) = x^{24} + x^{23} + x^{18} + x^{17} + x^{14} + x^{11} + x^{10} + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x + 1. \quad (4)$$

定义 $m(x)$ 为信息多项式,长度为 k ,导航电文格式中通常 $k < 600$; $s(x)$ 为编码发送多项式,长度为 N , $N = k + r$; $r(x)$ 为编码接收多项式,长度为 N ; $e(x)$ 为差错多项式,长度为 N , $r(x) = s(x) + e(x)$; $p(x)$ 为商多项式; $q(x)$ 为余多项式,最高项次数小于 r .

CRC 作为缩短循环码是一类特殊的分组码^[9],由于编码后的前 k bit 是信息位,所以是一种系统分组码,因此当 $N < 2^r - 1$ 时,CRC 除了不具有循环性外具有循环码的全部特性. 根据分组码的性质编码的纠错能力决定于最小码重 w ,分析 CRC-24 的纠错能力需要求解最小汉明码重 w ,分析过程如下:

① 由于 $g(x)$ 本身码重为 14,所以最小码重 $w \leq 14$;

② 由于 $g(x)$ 包含因子 $x + 1$,CRC-24 编码具有偶校验能力,所以最小码重不为奇数,即 $w \neq 2n + 1$, n 为整数;

③ 使用计算机遍历搜索 $N = 600$, $w = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ 的全部组合,得到 $w = 4$ 和 $w = 6$ 的信息多项式为

$$m(x) = x^{541} + x^{410} + x^{166} + 1, \quad (5)$$

$$m(x) = x^{54} + x^{45} + x^{43} + x^{30} + x^6 + 1. \quad (6)$$

综合分析结果,当 $N \leq 600$ 时 CRC-24 的最小码重为 4,可以纠正 1 bit 错误模式;当 $N \leq 540$ 时 CRC-24 的最小码重为 6,可以纠正 2 bit 错误模式,因此对于所有已知导航电文格式 CRC-24 编码能够纠正 1 bit 错误.

2.2 增强纠错的实现方法

使用 CRC 纠正导航电文中的错误有多种实现方法,最为典型的方法是按照循环码的纠错方式设计相应的纠错电路和算法,但实现方法还是比较复

杂的,这里给出一种基于查表法的实现方法.

根据 CRC 的性质,接收端的剩余多项式 $q(x)$ 仅与错误多项式 $e(x)$ 相关,与编码多项式 $s(x)$ 无关,因此 N 种 1 bit 错误模式一一对应于 N 种 $q(x)$,通过对 $q(x)$ 的查表搜索可以确定 1 bit 错误发生的位置.

导航电文 CRC 纠错实现方法如下:

① 将 N 种不同的 1 bit 错误帧依次送入译码器,获得 N 个 24 bit 剩余多项式,依错误位置顺序保存在一张纠错码表中;

② 接收机按照 CRC 检错原理, $r(x)$ 整除 $g(x)$ 得到 $q(x)$,如果 $q(x) \neq 0$ 则进入纠错处理,否则认为电文没有错误直接进行后续处理;

③ 在纠错码表中搜索比较 N 个余数,如果在码表中找到相同的 $q(x)$ 则根据位置信息纠错相应位置上的错误,如果没有找到相同的 $q(x)$,则认为发生不可纠正错误模式,接收机丢弃不可纠正错误电文.

查表方法需要 N 个码字的存储空间和算法复杂度 $O(N)$ 的线性搜索,在代价和速度上都具有较好的性能,适合工程实现,同时具有固定的处理时延,不会对定位解算产生不利影响.

3 导航电文增强纠错性能仿真

为了实际验证 CRC 编码的纠错能力和比较 CRC 纠错带来性能改善,采用实际导航电文格式对 CRC 纠错译码性能进行了仿真. 仿真采用 GPS CNAV 导航电文,导航电文帧结构如图 1 所示,电文帧长 300 bit,采用卷积码作为信道编码,检错编码为 CRC-24,设定卷积码纠错后的电文误码率为 $10^{-1} \sim 10^{-5}$,仿真实验在每种误码率下分别发送了 10^8 个数据帧 (3×10^{10} bit).

276 bit 电文数据	24 bit CRC 码
--------------	--------------

图 1 GPS CNAV 导航电文帧格式
Fig. 1 Frame format of GPS CNAV message

GPS CNAV 电文使用 CRC 增强纠错前后的误帧率性能比较如表 3.

比较增强纠错前后的误帧率,当误码率优于 10^{-3} 时,使用 CRC 增强纠错可以明显改善电文的误帧率,误帧率下降了 1~2 个数量级,部分错误电文纠正为正确电文. 但在高误码率条件下,CRC 辅助增强纠错对性能改善很小.

表3 GPS CNAV 电文增强纠错性能

Tab. 3 Performance of enhanced error correction on GPS CNAV messages

原始误码率 p	增强纠错前误帧率	增强纠错后误码率
10^{-1}	0.999	0.999
10^{-2}	0.951	0.802
10^{-3}	0.259	0.036
10^{-4}	0.029	4.39×10^{-4}
10^{-5}	2.99×10^{-3}	4.47×10^{-6}

4 结 论

目前卫星导航系统广泛采用 CRC 码作为导航电文的检错方案,同时导航系统其他链路如测控链路、星间链路也可使用 CRC 码作为数据传输的检错码,因此 CRC 码辅助增强纠错具有广泛的应用空间.虽然现有导航电文中包含卷积码等纠错编码,但是 CRC 增强纠错在不对信号电文结构进行更改的条件下提高了电文的纠错能力,充分利用了现有导航电文信号结构的能力.通过对导航电文进行 CRC 辅助纠错可以有效地降低卫星导航电文误帧率和提高导航的连续性,实现增强纠错仅需要在接收端增加有限的存储空间和计算复杂度,具有一定的实用价值.

参考文献:

- [1] Wolf Jack K, Fredrickson Lyle J, Viterbi Andrew J. Research in mathematics and computer science: calculation of the probability of undetected error for certain error detection codes. Phase 1, ADA-210302 [R]. San Diego, USA: Qualcomm Inc, 1989.
- [2] Viterbi Andrew J, Wolf Jack K, Fredrickson Lyle J, et al. Research in mathematics and computer science: calculation of the probability of undetected error for certain error detection codes. Phase 2, ADA-238234 [R]. San Diego, USA: Qualcomm Inc, 1991.
- [3] 杨杰,朱建锋,安建平.无线传输中的循环冗余校验码纠错应用扩展[J].北京理工大学学报,2005,25(8):726

-729.

- Yang Jie, Zhu Jianfeng, An Jianping. Extensive application of using cyclic redundancy check code to correct the error in wireless transmission [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(8):726-729. (in Chinese)
- [4] 杨锋,赵路,孙公航.个人手持系统利用循环冗余校验进行纠错的方法:中国,CN200510004887.2[P].2006-08-09.
- Yang Feng, Zhao Lu, Sun Gonghang. Method for error-correcting by circulation cyclic redundancy check for personal hand holding system: China, CN200510004887.2[P]. 2006-08-09. (in Chinese)
- [5] 陈金平,王梦丽,钱曙光.现代化 GNSS 导航电文设计分析[J].电子与信息学报,2011,33(1):211-217.
- Chen Jinping, Wang Mengli, Qian Shuguang. Analysis of modernization GNSS navigation message's designing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011,33(1):211-217. (in Chinese)
- [6] 刘黎.基于北斗系统的授时技术研究实现[D].合肥:安徽大学,2010.
- Liu Li. Research and implementation of timing technology based Beidou system[D]. Heifei: Anhui University, 2010. (in Chinese)
- [7] Betz J W, Cahn C R, Dafesh P A, et al. L1C signal design options[C]//Proceedings of ION NTM 2006. USA: ION, 2006:685-697.
- [8] Fontana Richard D, Cheung Wai, Novak Paul M, et al. The new L2 civil signal[EB/OL]. (2001-09-19)[2012-10-20]. <http://navcen.uscg.gov/pdf/gps/TheNewL2CivilSignal.pdf>.
- [9] 王新梅,肖国镇.纠错码:原理与方法[M].西安:西安电子科技大学出版社,2001:73-79.
- Wang Xinmei, Xiao Guozhen. Error correct coding: theory and method [M]. Xi'an: Xidian University Publishing House,2001:73-79. (in Chinese)

(责任编辑:刘芳)