

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.06.020

引用格式:夏利利,刘冰,周江,等. PCM 遥测帧同步技术性能分析[J]. 电讯技术,2014,54(6):803-807. [XIA Li-li, LIU Bing, ZHOU Jiang, et al. Synchronization Performance Analysis of PCM Telemetry Frame[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(6):803-807.]

PCM 遥测帧同步技术性能分析*

夏利利**,刘冰,周江,刘四方

(中国卫星海上测控部,江苏 江阴 214431)

摘要:在分析假同步和漏同步现象的基础上,介绍了脉冲编码调制(PCM)遥测帧同步工作的三态逻辑转换过程,通过进一步简化搜索态重叠区假同步概率计算公式,重新对搜索态和校核态的帧同步工作性能指标进行理论建模和仿真,根据仿真结果对影响帧同步性能的相关因素和参数进行讨论,为帧同步参数设计提供参考。

关键词:PCM 遥测帧;帧同步;同步概率;容错位数

中图分类号:TN919 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)06-0803-05

Synchronization Performance Analysis of PCM Telemetry Frame

XIA Li-li, LIU Bing, ZHOU Jiang, LIU Si-fang

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract:Based on the analysis of false alarms and misdetection in frame synchronization of Pulse Code Modulation(PCM) telemetry, three distinct operating modes of frame synchronizer are presented. By simplifying computational formula for false alarms in overlapping region of search mode further, the error performance index computational formulas of searching mode and verifying mode are theoretically analyzed and simulated. According to the results, the related influencing factors and parameters are discussed, thereby providing reference for frame synchronization parameters setting.

Key words:PCM telemetry frame;frame synchronization;synchronization probability;bit error tolerances

1 引言

帧同步码作为一帧数据的开始或结束标识,其识别与检出在航天器脉冲编码调制(PCM)遥测信息接收处理中起着至关重要的作用^[1-3]。为保证帧同步的准确性,减少假同步和漏同步,不仅要求帧同步码的相关性能优越,通常还要求帧同步器工作于三态逻辑转换过程^[4],即搜索、校核和锁定,三态转换由误码容限等参数进行判决控制^[1-2]。因此,帧同步性能的优劣除受信道噪声的影响外,还受逻辑转换判决参数的影响。

由于帧同步性能指标计算复杂^[1-5],一旦逻辑判决参数设置不合理,帧同步性能就会下降。2013

年,车载 USB 基带设备在设置一定帧同步参数的基础上,接收某卫星下行 PCM 遥测信号时,就出现了虚假帧同步现象,影响了遥测参数正常解算。为此,本文通过一定的简化计算,重点对搜索态和校核态帧同步性能及影响因素和参数进行分析讨论。

2 帧同步工作过程分析

2.1 假同步和漏同步现象分析

在遥测数据接收过程,接收端的帧同步器首先装订已知的固定帧同步码,并将其与输入的遥测数据进行逐位搜索比对,若比对差异在允许范围内,则

* 收稿日期:2013-10-21;修回日期:2014-03-28 Received date:2013-10-21;Revised date:2014-03-28

** 通讯作者:rainxialili@163.com Corresponding author:rainxialili@163.com

判断搜索到数据位即为帧同步码。在帧同步码的搜索比对过程中可能遇到 3 种情况。

2.1.1 随机区情况

这是指帧同步码完全未进入帧同步器,就是说进入帧同步器的完全是数据码。由于随机性,数据码会偶然形成帧同步码,出现假同步现象。假设数据码“1”和“0”出现的概率相同,各为 1/2,帧同步允许有 ε 位的错误,即容错位数为 ε ,则假同步概率为

$$P_F = \left(\frac{1}{2}\right)^n \sum_{r=0}^{\varepsilon} C_n^r \quad (1)$$

式中, $C_n^r = \frac{n!}{r!(n-r)!}$ 。

2.1.2 重叠区情况

这是指帧同步码有一部分进入帧同步器,而其余部分为随机数据码,这时由于噪声等因素影响,输入的帧同步码可能出现误码,与输入的部分随机数据码一起偶然形成与帧同步码相似的结构,也出现假同步现象,此时的假同步概率为

$$P_F = P_\delta \cdot P_{n-\delta} \quad (2)$$

其中, P_δ 为进入同步器的 δ 个帧同步码所造成的假同步概率, $P_{n-\delta}$ 为进入帧同步器的除 δ 个帧同步码以外的 $n-\delta$ 个随机数据码所造成的假同步概率。

2.1.3 完全同步区情况

这是指帧同步码完全进入帧同步器,这时可以判别是帧同步码的概率,即真同步概率为

$$P_T(\varepsilon) = \sum_{r=0}^{\varepsilon} C_n^r P_e^r (1-P_e)^{n-r} \quad (3)$$

式中, P_e 为遥测误码率, ε 为容错位数。由于噪声等因素的影响,输入的帧同步码可能出现误码,形成漏同步,其概率为

$$P_L(\varepsilon) = 1 - P_T(\varepsilon) \quad (4)$$

由上述分析可见,随机区和完全同步区判别同步的概率与所采用同步码模型无关,而在重叠区,假同步概率与所选用码组密切相关,通常将重叠区假同步概率最小作为判别“最佳”帧同步码的准则^[2]。本文后续的讨论均基于“最佳”帧同步码。

2.2 帧同步器三态逻辑工作过程

由于存在漏同步和假同步现象,帧同步器除了搜索比对外,还增加了校核验证过程和锁定情况下的失锁判决过程,即三逻辑判决转换控制过程,如图 1 所示。在校核态,根据帧同步码组周期性重复出现的特性,对搜索态找出的帧同步码位置进行连续验证。如果连续检查 k 帧全部达到校核容错要求,则帧同步器转入锁定态,并给出帧同步指示,否则帧

同步器回到搜索态重新搜索。在锁定态下,为了防止突发错误和抑制漏同步,继续检验帧同步码组位置的正确性,如果检查到连续 m 帧不符合锁定容错要求,则帧同步器回到搜索态,否则保持锁定态,给出锁定指示。3 种状态的容错位数和连续检查帧数等参数设置的不同,对帧同步性能的影响也不同。

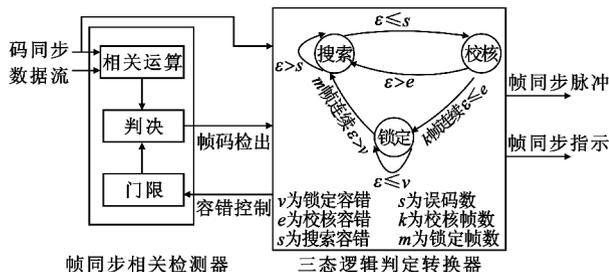


图 1 帧同步器原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of frame synchronizer

3 帧同步工作性能分析

由于帧同步锁定指示是遥测数据有效的判决依据,因此,本文重点对与帧同步入锁相关的搜索态和校核态的工作性能进行讨论,假设帧同步码组长为 n ,一帧数据块长为 M ,则帧长为 $M+n$,误码率为 P_e ,数据码随机出现,搜索容错位数为 s ,校核容错位数为 e ,校核帧数为 k ,下面进行相关性指标分析。

3.1 搜索态指标分析

要使搜索态捕获帧同步信号,就要求帧同步器在搜索捕获的完全同步区不漏失同步,在重叠区和随机区不产生假同步^[2]。

3.1.1 搜索态第 1 帧同步码漏失概率

完全同步区发生 s 位以上错码时即产生漏同步,其概率如公式(4)所示,即

$$P_{1MD} = 1 - \sum_{r=0}^s C_n^r P_e^r (1-P_e)^{n-r} \quad (5)$$

3.1.2 搜索态第 1 帧同步码虚假概率

它等于随机区和重叠区产生假同步的概率之和。对于最佳同步码,重叠区假同步概率值很小^[4],因其计算复杂,本文将其等同为随机区假同步概率^[5]。根据式(1),搜索态假同步概率为

$$P_{1F} = (M+n-1) \left(\frac{1}{2}\right)^n \sum_{r=0}^s C_n^r \quad (6)$$

由式(6)可见,假同步与误码率无关。

3.1.3 搜索态第 1 帧同步码真实概率

它等于完全同步区不产生漏同步概率与重叠区和随机区不产生假同步的概率之积,即

$$P_{1T} = (1 - P_{1F})(1 - P_{1MD}) = \left[1 - (M + n - 1) \left(\frac{1}{2} \right)^n \sum_{r=0}^s C_n^r \right] \times \left[\sum_{r=0}^s C_n^r P_e^r (1 - P_e)^{n-r} \right] \quad (7)$$

P_{1T} 也称为搜索一次捕获成功的概率^[5]。

3.1.4 平均搜索捕获时间

搜索一帧时间最长为 T_F (帧周期), 如果考虑第一帧漏同步, 则尚需进行第二帧搜索, 由于连续漏捕概率较小, 故只考虑到第一帧漏捕情况, 此时统计平均搜索时间为

$$t = (P_{1T} + P_{1F}) T_F + 2P_{1MD}^2 T_F \quad (8)$$

对于帧同步的搜索态, 总希望一次捕获成功概率接近 1, 假同步和漏同步概率接近零, 搜索捕获时间尽可能短。

3.2 校核态指标分析

3.2.1 校核 k 帧真同步入锁概率

真同步校核入锁的条件是: 搜索出第 1 帧同步码为真同步, 且在后续 k 帧校核验证均满足同步条件, 其概率可表示为

$$P_{kT} = P_{1T} P_{CT}^k \quad (9)$$

式中, P_{CT} 为校核帧完全同步区真同步概率, 即

$$P_{CT} = \sum_{r=0}^e C_n^r P_e^r (1 - P_e)^{n-r} \quad (10)$$

3.2.2 校核 k 帧假同步入锁概率

假同步校核入锁的条件是: 帧同步器搜索出第 1 帧同步码为假, 且在后续 k 帧校核均满足同步要求, 其概率可表示为

$$P_{kF} = P_{1F} P_{CF}^k \quad (11)$$

式中, P_{CF} 为校核帧随机区假同步概率, 即

$$P_{CF} = \left(\frac{1}{2} \right)^n \sum_{r=0}^e C_n^r \quad (12)$$

3.2.3 校核 k 帧不入锁概率

经过 k 帧校核既不出现真锁, 也不出现假锁的概率为

$$P_{kNL} = 1 - P_{kT} - P_{kF} \quad (13)$$

这时需要作第 2 次搜索和校核。

3.2.4 平均入锁时间

帧同步平均入锁时间包括 $k+1$ 帧同步锁定时间以及 $k+1$ 帧不锁需再次进行搜索校核的时间, 由于连续两个以上 $k+1$ 帧不锁的概率非常小, 故此处 $k+1$ 帧不锁的时间仅考虑到第二个 $k+1$ 帧进入锁定的情况。

$$t = (1 - P_{kNL})(k+1) T_F + 2(k+1) P_{kNL}^2 T_F \quad (14)$$

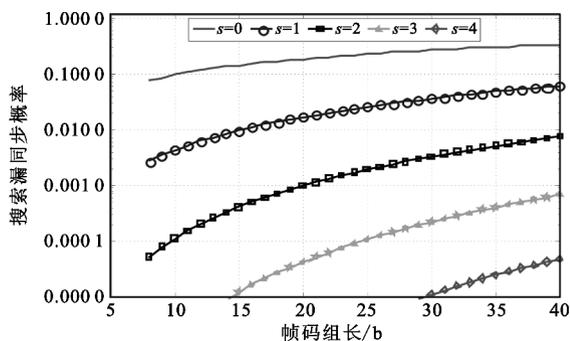
对于一个性能良好的帧同步系统, 总希望真同

步入锁概率接近 1 (或假锁和不锁概率接近零), 平均锁定时间尽量短。

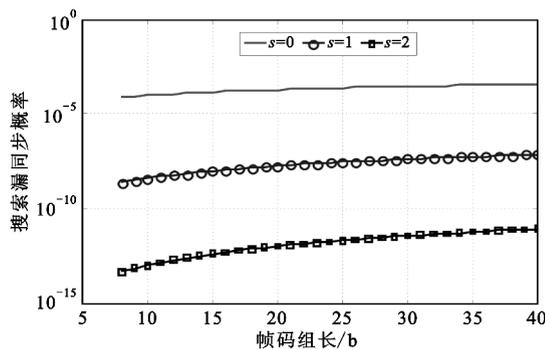
4 仿真结果及分析

4.1 搜索态仿真结果及分析

由于一般卫星遥测为固定帧长, 故假设数据块长 M 取 8 168 b, 并设误码率分别为 $P_e = 10^{-2}$ 和 $P_e = 10^{-5}$, 搜索容错位数 $s \geq 0$, 则根据公式 (5) ~ (7) 得出的搜索态漏同步概率、假同步概率、真同步概率与帧码组长 n 的关系曲线分别如图 2 ~ 4 所示。



(a) $P_e = 10^{-2}$



(b) $P_e = 10^{-5}$

图 2 搜索漏同步概率

Fig. 2 Misdetection probability in searching mode

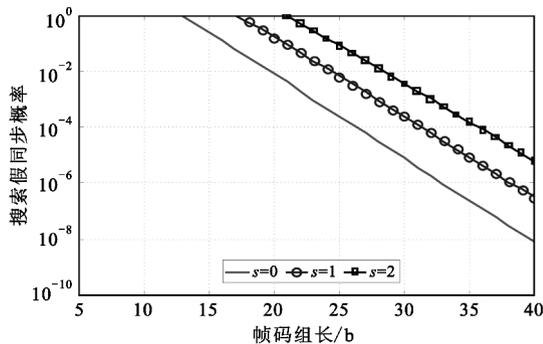
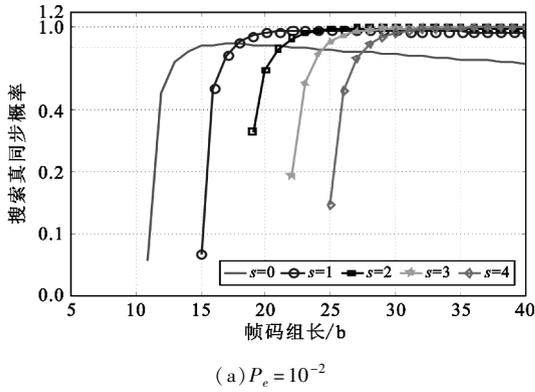
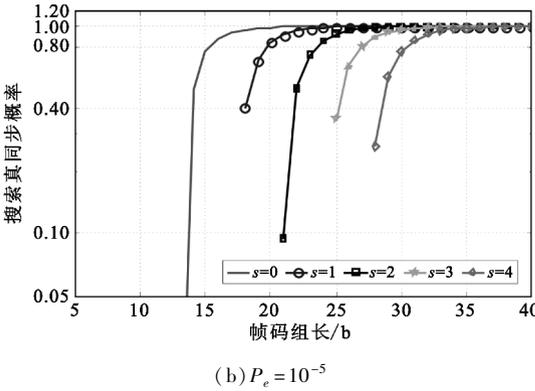


图 3 搜索假同步概率

Fig. 3 False alarm probability in searching mode



(a) $P_e = 10^{-2}$



(b) $P_e = 10^{-5}$

图4 搜索真同步概率

Fig. 4 True synchronization probability in searching mode

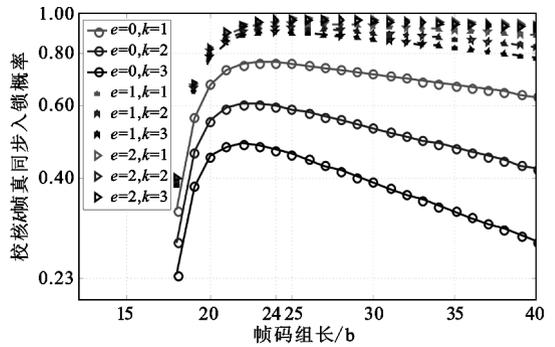
从图2中可以看出,搜索漏同步概率随帧码组长度的增加、搜索容错位数的减少而增加;在搜索容错位数和帧码组长度相同条件下,误码率越高,漏同步概率越大。由图3则看出,搜索假同步概率随帧码组长度的增加、搜索容错位数的减少而减小。而比较图4(a)和(b)则可看出,要达到一定的真同步概率或一次捕获成功概率,帧码组需达到一定的长度,且搜索容错位数越多,误码率越低,所需的帧同步码组长。

综合比较分析图2~4可得出假设条件下高、低误码率对应的帧码组长和搜索容错位数等参数的理想选值。首先由图3可知,要使假同步概率小于1%,帧码组长 n 需大于20,又因其一般为字节长(8位)的整数倍,故可取为24,32等。若 n 取24,在高误码率($P_e = 10^{-2}$)条件下,由图4(a)可知,当搜索容错位数为0时,真同步概率低于85%,要使真同步概率接近1,搜索容错位数可设置为1和2,但由图2(a)和图3可知,当搜索容错为2时,漏同步概率低于0.2%,假同步概率约为10%;当搜索容错为1时,漏同步概率约为2%,假同步概率低于1%,故搜索容错设置为1较为合理。在低误码($P_e = 10^{-5}$)情况下,同理可由图2(b)、图3和图4(b)分析得

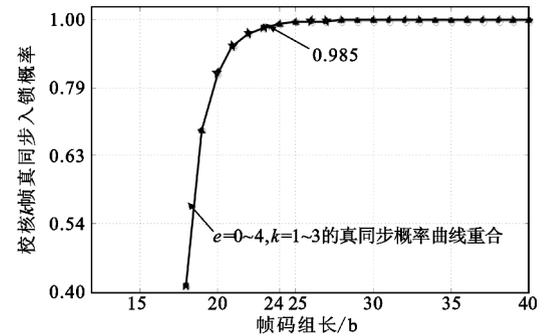
出,搜索容错可设置为0或1较为合理。另外,当帧周期较长时,搜索容错位数的设置还应考虑对平均搜索捕获时间(见公式(8))的影响,具体分析此处略去。

4.2 校核态仿真结果及分析

假设数据块长 M 取8 168 b,搜索容错取1,校核容错为 e ,校核帧数为 k ,则当误码率为 $P_e = 10^{-2}$ 和 $P_e = 10^{-5}$ 时,根据公式(9)得出的真同步校核 k 帧入锁概率 P_{kT} 与帧码组长 n 的关系如图5所示;根据公式(11)得出的假同步校核 k 帧入锁概率 P_{kF} 与帧码组长 n 的关系如图6所示。



(a) $P_e = 10^{-2}$



(b) $P_e = 10^{-5}$

图5 校核 k 帧真同步入锁概率

Fig. 5 True synchronization probability in verifying mode

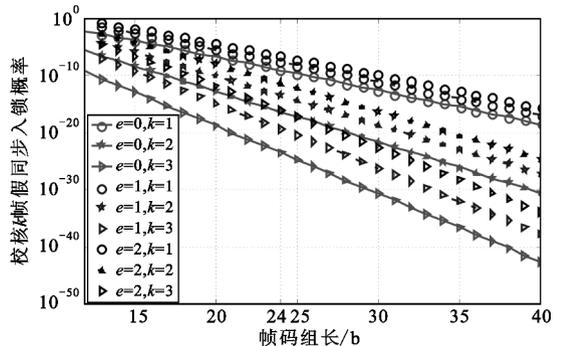


图6 校核 k 帧假同步入锁概率

Fig. 6 False alarm probability in verifying mode

从图 5(a) 可以看到, 高误码率条件下, 随着帧码组长度的增加, 真同步入锁概率先增大后减小, 存在最大值; 且校核容错位数越多, 校核帧数越少, 真同步入锁概率越大。由图 5(b) 可见, 低误码率情况下, 真同步入锁概率随着帧码组长度的增加而增加, 并最终趋近于 1, 校核容错位数和校核帧数对其影响不大。由图 6 中可知, 假同步入锁概率随帧码组长度的增加、校核容错位数的减少和校核帧数的增多呈递减趋势。

综合分析图 5~6 可得出两种误码率条件下的校核容错位数和校核帧数的理想选值。若帧码组长 n 取 24, 则在高误码率 ($P_e = 10^{-2}$) 情况下, 从图 5(a) 可以看出, 要使真同步校核入锁概率达到 95%, 校核容错位数 $e > 1$, 此时, 由图 6 可见, 假同步入锁概率很小, 几乎可以忽略, 且随着校核帧数增加而降低, 但校核帧数不能过多, 以免帧同步平均入锁时间过长, 见公式 (14), 故校核帧数一般可取 1~3。低误码率 ($P_e = 10^{-5}$) 条件下, 由图 5(b) 可见, 真同步入锁概率高达 98.5%, 不同校核帧数和校核容错位数差别很小, 又由图 6 可见, 假同步入锁概率随着校核容错位数的增加而增加, 但远小于 1%, 几乎可以忽略, 故校核容错位数 $e \geq 0$, 校核帧数可取 1~3。

综合 3.1 节和 3.2 节分析, 在实际卫星遥测帧长、帧同步码组长已知的条件下, 帧同步参数的选择其实是在真、假、漏同步之间的一种折衷考虑。

5 结束语

本文在文献 [2] 的基础上, 通过进一步简化搜索态重叠区假同步概率计算公式, 对搜索态和校核态的帧同步工作性能进行了理论建模和仿真, 根据仿真结果分析了相关因素和参数择选的影响, 为帧同步参数设置提供理论参考。

由于 PCM 数据流的帧同步过程基本相似, 故本文建立的指标模型可为其他 PCM 数据流的帧同步性能分析提供借鉴。

参考文献:

[1] 陈宜元, 刘政凯, 徐佩霞, 等. 遥测遥控信息传输原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.

CHEN Yi-yuan, LIU Zheng-kai, XU Pei-xia, et al. Telemetry & Telecommand Communication Principles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980. (in Chinese)

[2] 谢铭勋. 再入遥测技术 (上册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.

XIE Ming-xun. Reentry Telemetry Technology (Book 1) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992. (in Chinese)

[3] Bastaki E M, Tan H H, Shi Y, et al. Frame synchronization based on multiple frame observations [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(3): 1097-1100.

[4] 谢求成. N=7-32 位最佳群同步码的研究与推荐 [J]. 遥测遥控, 1989, 10(4): 19-27.

XIE Qiu-cheng. Research on and Recommendations for optimum PCM group synchronization codes for N=7 to 32 bits [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 1989, 10(4): 19-27. (in Chinese)

[5] 李邦复. 遥测系统 (上册) [M]. 北京: 宇航出版社, 1991. LI Bang-fu. Telemetry System (Book 1) [M]. Beijing: Aerospace Publishing House, 1991. (in Chinese)

作者简介:



夏利利 (1984—), 女, 江苏盐城人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天测控数字信号处理技术;

XIA Li-li was born in Yancheng, Jiangsu Province, in 1984. She is now an engineer with the M. S. degree. Her research concerns digital signal processing for space TT&C system.

Email: rainxialili@163.com

刘冰 (1968—), 男, 江苏扬州人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天测控总体;

LIU Bing was born in Yangzhou, Jiangsu Province, in 1968. He is now a senior engineer with the M. S. degree. His research concerns space TT&C system.

周江 (1974—), 男, 江苏南通人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天测控总体;

ZHOU Jiang was born in Nantong, Jiangsu Province, in 1974. He is now a senior engineer with the M. S. degree. His research concerns space TT&C system.

刘四方 (1978—), 男, 河北承德人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天测控射频信道技术。

LIU Si-fang was born in Chengde, Jiangsu Province, in 1978. He is now an engineer with the M. S. degree. His research concerns wireless channel of space TT&C system.