

LEO 小卫星突发数据通信系统中 载波恢复环路的误捕获分析

李 荔, 陈寅健, 梁旭文, 杨根庆

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所中国科学院上海小卫星工程部, 上海 200052)

摘 要: 本文对 LEO 小卫星突发数据通信系统中载波恢复环路的误捕获现象进行了分析与计算机仿真, 并根据分析与仿真的结果提出了一种实用的抗误捕获设计方法. 本文的分析结果在实际系统测量中得到了验证, 对于类似系统的抗误捕获设计与分析有一定的实际意义.

关键词: 突发数据通信系统; LEO (低轨道) 小卫星通信系统; 误捕获; COSTAS 环路

中图分类号: TN927 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2002) 06-0832-04

Analysis of False Lock in Phase Recovery Loop for LEO Micro2Satellite Burst2Mode Communication System

LI Li, CHEN Yin2jian, LIANG Xu2wen, YANG Gen2qing

(Shanghai Institute of Micro2System and Information Technology, Chinese Academy of Science Shanghai
Department of Micro2Satellite Engineering, Chinese Academy of Science, Shanghai 200052, China)

Abstract: This paper presents a computer2aided analysis of false lock in phase recovery loop for LEO micro2satellite burst2mode communication system, based on which a method is set up for ant2false2lock design. The measurement of an actual burst2mode communication system proves the validity of the method of analysis and design.

Key words: burst2mode communication system; LEO (Low Earth Orbit) micro2satellite communication system; false lock; COSTAS loop

1 引言

目前, LEO 小卫星突发数据通信系统的应用越来越受到人们的重视. 除了常见的寻呼应用之外, 对于森林火灾报警、水位监测、海运等应用而言, 更加体现了其重要性. 目前 LEO 小卫星通信系统大多数都采用 BPSK/QPSK 的平衡调制(即完全抑制载波)体制. 这种调制体制的应用要求解调时用载波恢复环路恢复载波后才能进行正确的相关数据解调. 而突发数据传输应用由于其数据帧短, 并且信息冗余度小, 要求数据解调时间快而且可靠.

误捕获是影响 LEO 小卫星通信系统工作可靠性的一种典型故障现象, 尤其对于突发方式的数据传输应用而言, 如何分析并克服这种错误行为非常重要. 它的出现不仅与载波恢复环路的结构有关, 还与整个系统设计以及信号本身的特性密切相关. 即使在大信噪比的情况下, 该环路也有可能向解调系统提供一个错误的载波信号并且保持锁定状态, 从而导致数据恢复错误且不能马上恢复到正常工作的状态. 由于误捕获现象的触发条件与很多具体因素有关, 一般在设计阶段及测试模式下运行下不容易被发现, 所以常常被忽视, 但会成为

影响系统工作可靠性的一个潜在重要因素.

实际系统中的载波恢复环路由于其它设计约束的缘故往往会有比较复杂的结构, 并且采取的辅助判断使得环路中可能同时包含模拟量和开关量. 而对这种环路的分析由于其非线性以及存在多个平衡态无法运用常规的线性理论^[1]. 此时用常规的分析与计算机仿真方法非常复杂. 本文结合 LEO 小卫星通信系统载波恢复环路的应用特点, 通过对载波恢复环路模型的提取与重整, 对误捕获问题进行了分析, 并对抗误捕获设计方法进行了探讨.

2 关于载波恢复环路误捕获的已有研究成果

载波恢复环路中的误捕获问题, 是指环路在某一段时间内锁定在非预期信号载波上, 影响正常的载波捕获, 从而影响数据解调. 尤其是当系统依赖于载波恢复环路给出的锁定指示来判别接收数据是否有效时, 这种误捕获现象可能带来不可想象的后果(比如对于卫星的测控指令传输通道).

对载波恢复环路中的误捕获行为, 至今已有大量的文献进行描述和分析^[2-6, 8, 10]. 其中 COSTAS 环路由于简单、实用而得到广泛的应用. COSTAS 环路中出现的误捕获行为主要是

因为: (1) 滤波器导致信号的畸变^[3,5,6]; (2) 数字实现时 A/D 采样导致的“假信号”干扰^[4]; (3) 外在干扰的存在。

然而, 以上文献的研究针对结构比较简单的载波恢复环路, 并且对外在干扰引起的误捕获考虑较少。而实际应用中的载波恢复环路设计往往要考虑到抗多普勒频移、恢复时间、相位抖动等多方面的因素, 如在 LEO 小卫星通信系统中的设计 (如图 1 所示), 这使得实际的环路往往有较复杂的结构。并且由于 LEO 小卫星通信系统所使用的 VHF、UHF 频段干扰现象比较严重, 外在干扰引起的误捕获现象不可忽视。

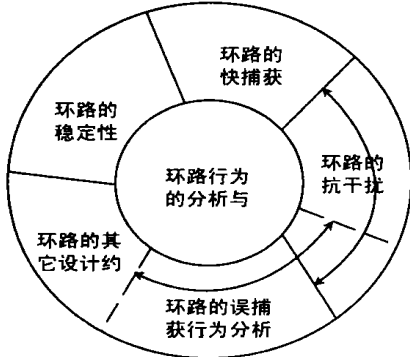


图 1 载波恢复环路设计中的几个相关问题

本文在以下部分将结合 LEO 小卫星突发数据通信系统中载波恢复环路的特点, 对之进行建模与分析。

3 LEO 小卫星突发数据通信系统中载波恢复环路误捕获的分析

LEO 小卫星突发数据通信系统中的载波恢复环路至少需要满足以下几个要求: (1) 能补偿信号中多普勒频移的影响, 这是由低轨道卫星的运动造成的; (2) 载波恢复时间快, 因为突发数据传输时间一般比较短; (3) 载波恢复可靠, 尤其是对于测控信道而言。相应地, 也会具有以下几个特点: (1) 由于受低功耗的约束, 大多数系统都采用 BPSK/QPSK 的平衡调制 (即完全抑制载波) 体制, 这使得载波恢复环路在设计时需要利用数据波形的平方来消除数据变化的影响; (2) 为了加快捕获时间, 通常会靠增加外界扰动的方式; (3) 辅助判断是常用的抗误捕获手段, 如 DD (基于数据波形的辅助判别)、DA (基于数据的辅助判别)。根据以上的分析, 再考虑到分析的方便, 可以得到以下的载波恢复环路等效模型。

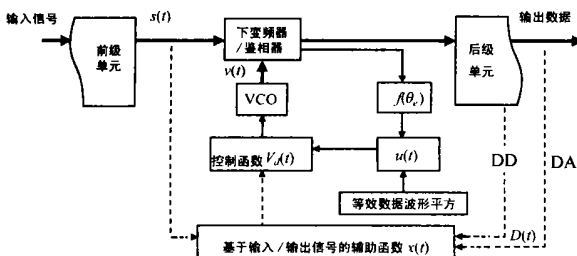


图 2 载波恢复环路误捕获分析的等效模型

图 2 为 LEO 小卫星通信系统中载波恢复环路的模型, 其中: 粗的实线代表信号通路, 通路中的下变频器、VCO 是不可

少的功能部件; 细的实线以及该通路中的几个模块代表基本的载波恢复环路结构; 虚线以及与其相连接的辅助判断模块表示针对其它设计目的 (如抗多普勒频移、抗误捕获、快捕获等) 可能增添的功能模块, 常用的几种方法如 DD (Decision Directed, 基于波形判别)、DA (Data Aided, 基于数据)。图 2 中引入的数据波形平方功能模块与常规环路模型不同, 它是为了分析与设计方便对模型重整的结果。这将在以下详细说明。

载波恢复环路输入端的信号为

$$s(t) = k \cos(\omega_c t + \theta) + n(t)$$

其中 $n(t)$ 为噪声信号, k 为幅度, $\omega_c(t)$ 为受滤波器影响的数据信号, 可以表示为

$$\omega_c(t) = \omega_c + \int_0^t g(S) h_c(t-S) dS$$

其中 $g(t)$ 为无带宽限制的数据信号, 即其平方值恒为 1 (数据信号为非归零模式, 即数据的“0”是由“-10”来代表的)。 $h_c(t)$ 为环路前等效滤波器的时域响应。

VCO 的输出信号为:

$$v(t) = A \cos(\omega t + K V_d t + \theta)$$

其中 A 为输出信号的幅度, ω 为 VCO 的中心频率, V_d 为加在 VCO 上的最终控制电压, K 为 VCO 的灵敏度。由于对于 BPSK/QPSK/MPSK 平衡调制体制中的解调实现来说, 载波恢复环路往往还要同时完成相位恢复的功能。实际应用中 (如 COSTAS 环和平方环) 利用数据波形平方 $(g_c(t))^2$ 来消除由于数据中“0”、“1”跳变带来的相位突变给载波恢复带来的影响。这样图 2 中的等效数据波形平方可以表示为 $K(g_c(t))^2$, K 为常数。

由上不难推导出图 2 中一般模型的公式化表示为:

$$\begin{cases} \dot{H}_e = (\omega_c - X)t + (\theta - H) \\ \dot{\omega}_c t = \omega t + \int_0^t K V_d(t) dt \\ V_d(t) = p(u(t), x(t)) \\ x(t) = q(s(t), D(t)) \\ u(t) = r(K(g_c(t))^2, f(H_e)) \end{cases} \quad (1)$$

其中 H_e 为相位误差。令 $X = \omega_c - \omega$

$$\begin{aligned} \dot{H}_e(t) &= (\omega_c - X)t + (\theta - H) + \int_0^t K V_d dt \\ &= X_0 t + (\theta - H) + \int_0^t K V_d dt \end{aligned} \quad (2)$$

求 H_e 的一阶导数可得:

$$\frac{dH_e(t)}{dt} = X_0 - \frac{dX(t)}{dt} t + K V_d(H_e, t) \quad (3)$$

其中上式等号右边的第二项考虑了时变频移的因素, 环路正确锁定的条件是

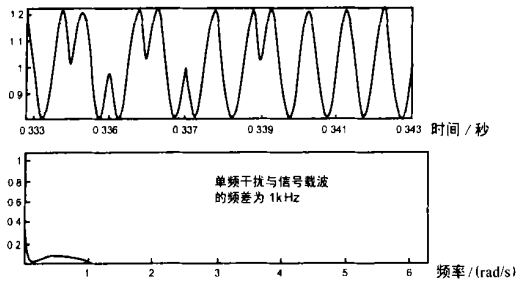
$$dH_e/dt = 0, \quad d^2H_e/(dt)^2 > 0 \quad (4)$$

出现误捕获的情况即意味着式 (3) 成立但式 (4) 不成立。

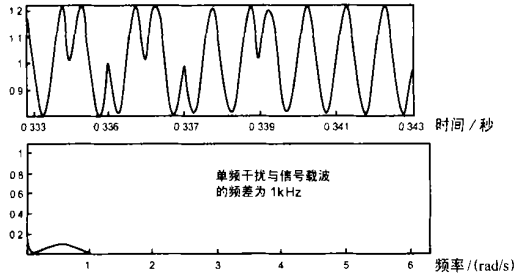
3.1 无多普勒频移情况下 COSTAS 环路的误捕获分析

为了进一步明确上述模型的意义, 考虑无多普勒频移时 COSTAS 环路的情况。此时 $x(t)$ 为零 (不存在辅助判断)。同时考虑鉴相器的响应为正弦响应, 则有:

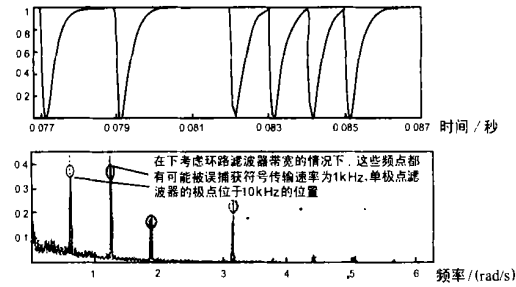
$$u(t) = \frac{A^2 k^2}{8} \cos(\omega_c(t))^2 \sin(2H_e)$$



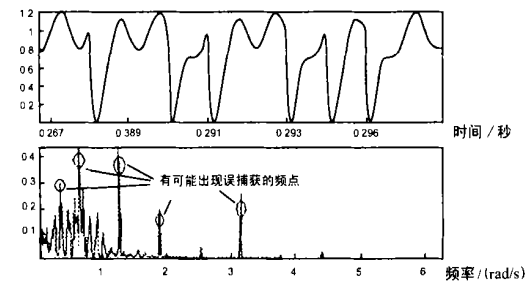
(a) 理想波形信号的平方以及平均后的频谱, 此时仅有直流分量



(b) 理想信号与带内单频干扰共存的情况, (幅度比为 10:1), 此时出现干扰频谱



(c) 带限信号的平方以及平均后的频谱, 此时在与符号传输速率相应的频率以及倍频上出现明显的频谱分量



(d) 带限信号与带内单频干扰共存的情况 (幅度比为 10:1), 注意此时的干扰分量相对二图 c 增多, 这增加了误捕获的可能

图 3

将上式代入式(3)为:

$$\frac{dH_c(t)}{dt} = \int X_0 + K \frac{A^2 k^2}{8} \int_0^1 (g_c(S))^2 \sin(2S X S) h(t - S) dS \quad (5)$$

其中 $h(t)$ 为 COSTAS 环路滤波器的响应函数, 并且用 $\int X$ 代替了 H_c , 因为误捕获发生即意味着 $\int X \neq 0$, H_c 不再为常数. 在式(5)的基础上分析 COSTAS 环路的误捕获行为, 只需与式(5)

联立求解. 误捕获分析关心的结果是对一个假定的输入信号, 在哪些频点什么条件下有可能发生误捕获. 将 $H_c = \int X$ 代入到式(5)中, 注意到可以对其进行时域到频域的变换. 从频域上容易发现, 只要 $g_c(t)$ 平方的频谱中存在有 $\sin(2S X)$ 的分量, 且环路滤波器的带宽小于四倍 $\int X$, 则等式就有可能成立, 即可能在 $\int X = (nR_s/2)$ 时锁定 (R_s 为符号传输速率, n 为正整数) (如图 3c 所示). 这个结论与相关文献的已有结果一致.

当进一步考虑存在外在干扰时的误捕获情况时, 只需用一个等效的 $g_{c1}(t)$ 来代替 $g_c(t)$ 即可. 为简单起见考虑单频干扰的情况, 此时

$$g_{c1}(t) = g_c(t) + C \cos(X_1 t + C)$$

将之代入式(5), 同样在频域上看出, 此时有可能存在一些频点有可能被误锁定 (如图 3(d)). 见下图所示. 类似地, 对于其它类型干扰同样可以基于式(5)的基础上进行分析.

3.2 存在多普勒频移时 COSTAS 环路的误捕获分析

对于 LEO 小卫星通信系统来说, 多普勒频移的变化粗略近似为正弦曲线^[12]. 将之添加到式(5)中则有:

$$\begin{aligned} \frac{dH_c(t)}{dt} = & \int X_0 - \frac{dX}{dt} + K \frac{A^2 k^2}{8} \int_0^1 (g_c(S))^2 \\ & \# \sin(2S X S) h(t - S) dS \\ & U \int X_0 - D \cos(X_{1pt}) + K \frac{A^2 k^2}{8} \\ & \# \int_0^1 (g_c(S))^2 \sin(2S X S) h(t - S) dS \quad (6) \end{aligned}$$

同样将 $H_c = \int X$ 代入上式然后进行频域变换. 假设 H_c 在某一时间段内为常数 (环路暂时锁定), 从式(7)可以看出, 除非此时信号的平方序列中恰好能提供一个对应频谱分量来抵消多普勒频移的影响, 否则该等式不能成立. 这说明对于一个存在频移的信号载波, 除非预先知道频移的规律, 否则不可能做到实时的准确捕获.

3.1.3 复杂环境下辅助判断环路的误捕获分析

所谓复杂环境, 是指同时存在多普勒频移 (或其它类型的时变频移) 以及外在干扰信号的情况. 此时, 为了满足捕获时间并补偿多普勒频移, 一种常用的手段是在 VCO 控制端加扫频电压^[7]; 为了满足抗干扰的能力, 可能需要引入窄带滤波器与相关 AGC^[2]; 为了满足抗误捕获的能力, 需要引入辅助判断 (如 DD、DA).

同时考虑上述因素以及外在干扰的因素, 对于公式(1)而言, 等效于增加了外在干扰信号 $s_1(t)$, 即 $g_c(t) = g_c(t) + s_1$ 结合式(3)并且考虑到实际应用情况中一般有:

$$\begin{cases} V_d(t) = u(t) + x(t) \\ u(t) = K \int_0^1 (g_c(S))^2 \int f(H_c(S)) \int h_L(t - S) dS \end{cases} \quad (7)$$

$h_L(t)$ 为环路滤波器的时域响应.

同样将 $H_c = \int X$ 代入, 对式(7)进行频域变换后利用数值计算可以找出可能出现误捕获的频点. 注意到 A 中分析的特点在于: 对信号部分 (包含外在干扰) 的分析与对环路结构的分析是相互独立的. 这意味着即使对于复杂结构的环路, 也可

以按如下步骤进行分析:首先对环路的输入信号(包括外在干扰)平方进行频谱分析,找出其中可能产生误捕获的频点;然后根据环路结构来分析这些频点是否落在环路的等效滤波器带宽之内,从而判断是否会被误捕获.如下图所示:

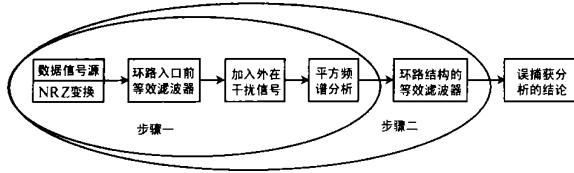


图 4 误捕获分析的一个简单流程

值得注意的是当辅助判断存在时,等效滤波器的时域响应往往为非线性的,这时不能直接变换到频域上去分析.但注意到环路处在锁定状态下时辅助判断中的开关控制量状态不变,在此基础上可以进行频域变换.另外,载波恢复环路往往和系统中其它的环路存在耦合关系(如 DD、DA 辅助判断中就与时钟同步环路等存在耦合),此时一方面可以借助于计算机仿真;另一方面可以利用各环路之间的时间尺度差异进行解耦来简化分析.

4 载波恢复环路的抗误捕获设计

载波恢复环路的抗误捕获设计的目标在于:在满足功能设计目标的前提下,找出环路发生误捕获的可能情况,并采取一定措施确定在指定范围的工作模式下不会出现误捕获的现象.在以上分析中,误捕获的存在由频域上存在可能产生(锁定)的频点相对应.由此,在以下的情况中可以认为符合了抗误捕获设计的要求:

(a) 上述分析中频域不存在这样的频点.

(b) 可能产生误捕获的频点在环路结构的等效滤波器带宽以外.

(c) 即使频点落在等效滤波器带宽以内,但通过辅助判断的方式使环路不会锁定这些频点.

从上述分析的过程来看,有如下方法可以采用:

(a) 消除滤波器对数据信号波形的带限效应,这可以通过硬限幅等波形再生的方法作到,这还可以消除小的外在干扰的影响;但由于其非线性,给设计与分析都带来的难度,所以该方法适用于较简单的环路.

(b) 在频域上考虑设计合适的等效滤波器滤除可能产生误捕获的频点,由于滤波器的设计是基于线性理论,有利于环路行为的分析与设计;但对于某些存在辅助判断的情况不能运用线性化近似.

(c) 在时域上结合计算机仿真来分析复杂结构的环路行为;其缺点在于仿真结果往往不能象理论分析那样直接对设计进行指导.

由于抗误捕获设计与具体参数的关系密切,限于篇幅,本文对具体的设计流程不在此描述.在对某型号小卫星通信系统的测量与分析中,结果与以上基于本文中等效模型的误捕获分析的结果相符合.

5 总结

误捕获现象对/短数据0这种应用方式的可靠性有非常重要的影响.本文结合 LEO 小卫星通信系统载波恢复环路的应用特点提出了相应载波恢复环路的等效模型,并基于该模型对误捕获行为进行了分析且对设计方法进行了考虑.本文提出的分析思路与设计方法简单、实用,对于类似系统的分析与设计有实际意义.

参考文献:

- [1] V V Shakhgulyan, S S Sviridenko. Phase synchronization system studies [J]. IEEE Trans on Comm, 1982, COM23(10): 2260- 2263.
- [2] Floyd M. Gardner. Phaselock Techniques [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1979.
- [3] G L Hedin, J K Holmes, W C Lindsey, etc. Theory of false lock in costas loops [J]. IEEE Trans on Comm, 1978, COM26(1): 1- 12.
- [4] Marvin K, Simon, Kai T Woo. Alias lock behavior of sampled data Costas loops [J]. IEEE Trans on Comm, 1980, COM28(8): 1315- 1325.
- [5] Tadao Shimamura. On false lock phenomena in carrier tracking loops [J]. IEEE Trans on Comm, 1980, COM28(8): 1326- 1334.
- [6] Suiyin Tung Kleinberg, Horen Chang. Sideband false lock performance of squaring, fourth power, and quadriphase costas loops for NRZ data signals [J]. IEEE Trans on Comm, 1980, COM28(8): 1335- 1342.
- [7] Jurgen Tusch. On frequency sweeping in phaselocked loops [J]. IEEE Trans, On Comm, 1984, COM32(8): 969- 972.
- [8] Marco Luise, Ruggero Reggiani. Carrier frequency recovery in all digital modems for burst mode transmissions [J]. IEEE Trans on Comm, 1995, 43(2/3/4): 1169- 1178.
- [9] K J 奥斯特隆姆, B 威顿马克. 自适应控制[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [10] Donald R Stephens. Phaselocked Loops for Wireless Communications: Digital and Analog Implementations [M]. Holland: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [11] Q2368 High Speed Dual DDS for Globalstar [Z]. Application Note from Qualcomm Corporation.

作者简介:

李 荔 男, 1975 年出生于湖南衡阳, 毕业于南京大学物理系. 2001 年在中国科学院上海微系统与信息技术研究所(原上海冶金研究所)获得工科博士学位, 目前主要从事无线通信系统设计与仿真方面的研究.

陈寅健 男, 1975 年出生于浙江嘉兴, 2001 年在中国科学院上海微系统与信息技术研究所(原上海冶金研究所)获得工科博士学位, 现主要从事第三代移动系统研究和设计.