

基于加权系数的DTTL遥测测距符号同步算法

侯彦兵, 焦义文, 杨文革

(航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416)

摘要: 遥测测距是美国喷气推进实验室于2010年提出的新型测距方法, 其核心思想是将测距信息插入遥测帧中下发, 利用一路遥测信号同时完成遥测、测距两种功能, 地面站对帧头到达时刻的估计精度直接影响测距精度。针对现有DTTL符号同步算法精度不高的问题, 研究了一种基于加权系数的DTTL符号同步算法, 通过对每个遥测符号首位、末位采样点进行加权处理再积分的方法, 有效提高了符号同步精度, 仿真进一步验证了方法的有效性, 结果表明该算法在信噪比为-5 dB时能达到现有算法理想条件下的性能, 均方差约为0.01个遥测符号。

关键词: 遥测测距; 符号同步; 数据转换跟踪环路; 帧头

中图分类号: TN919.3⁺⁴ 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2020)01-0051-05

Telemetry Ranging Symbol Synchronization Based on Weighted Coefficient DTTL Algorithm

HOU Yanbing, JIAO Yiwen, YANG Wenge

(Department of Electronics and Optical Engineering, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Telemetry ranging is a new ranging method proposed by JPL in 2010. The core idea is to insert the ranging information into the telemetry frame and use the only one telemetry signal to complete both telemetry and ranging functions. The accuracy of the estimation arrival time of the attached synchronization marker by the ground station directly affects the ranging accuracy in telemetry ranging. Aiming at the problem that the existing DTTL symbol synchronization algorithm is not accurate enough, a weighted sum DTTL symbol synchronization algorithm is proposed. By weighting the first sample and the last sample of each telemetry symbol in summation and then integrating, the synchronization accuracy is effectively improved. Simulation is carried out to further verify the effectiveness of the proposed method. The results show that the proposed algorithm can achieve the performance of the existing algorithm under the ideal conditions at SNR of -5 dB, and the mean square error is about 0.01 telemetry symbols.

Key words: telemetry ranging; symbol synchronization; data transition tracking loop (DTTL); attached synchronization marker (ASM)

0 引言

遥测测距可以有效解决深空测距下行链路同时传输遥测、测距信号会出现的频谱带宽增加、遥测数据传输速率受限等问题^[1], 具有巨大的发展潜力。其技术优势在于将有限的飞行器功率完全提供给遥测链路, 增加遥测数据的传输速率^[2]; 由

于下行链路不发测距信号, 频谱带宽相应压缩, 也不存在现有测距技术遥测信号和测距信号相互干扰的问题^[3]。

准确估计遥测帧头到达地面站时刻是遥测测距的关键技术之一, 这是因为遥测测距求取双向距离是通过对同一遥测帧头到达飞行器和地面站时刻的发射机测距码相位值进行积分实现的。由于该触发帧帧头在飞行器产生, 未受噪声干扰, 因

此相较于飞行器端,地面站对该帧头到达时刻的估计相对来说更难,这是由深空距离极远,干扰极大的特点决定^[4]。目前,由于遥测信号的主要功能集中在将飞行器测得的工作参数或科学数据等发回地面,遥测信号的研究重点保证正确、高效判决,鲜见提高遥测帧头到达时刻估计精度的文献。

地面站接收遥测信号后依次进行下变频和载波跟踪处理,载波同步后再进行符号同步、帧同步。符号同步的作用是确定码元的起始和结束时刻,以便最大限度地利用整个符号周期内的能量进行积分,完成遥测符号判决^[5];帧同步目标是在遥测符号流中找到帧头,地面站即可按照预定顺序找到对应参数。两个步骤实质上可分别得到遥测帧头到达地面站的小数时刻和整数时刻。软件无线电技术的发展使地面站用基带处理遥测信号成为现实^[6],地面站完成帧同步后,高性能计算机可以保证帧头到达时刻的整数位精度。目前,广泛采用基于数据转换跟踪环路(Data Transition Tracking Loop,DTTL)的算法完成符号同步^[7],但该算法忽略了离散采样对中相积分器的影响,精度不高,不适合遥测测距。针对上述问题,本文重点研究了文献[8]提出的基于加权系数的DTTL 算法,通过对离散点加权消除采样的影响,分析和仿真结果均表明该算法符号同步精度高,适合遥测测距技术。

1 遥测测距原理与帧结构设计

1.1 遥测测距原理分析

图 1 给出了遥测测距的原理框图。如图所示,地面站持续发送上行再生伪码测距信号,飞行器发送下行遥测信号,飞行器捕获 PN 码信号并测量当前遥测帧头脉冲前沿到达时刻 t_s 时的测距码相位值 $\psi_s(t_s)$,将该相位值插入遥测帧中下发。地面站接收遥测信号进行同步处理,假设跟踪环路捕获飞行器上该触发帧头到达地面的时刻为 t_R ,地面站测量出 t_R 时刻的发射机相位 $\psi_T(t_R)$ 。地面站解调出遥测符号流后,提取出星上插入的码相位 $\psi_s(t_s)$,由相位的连续性可知, t_s 时刻的码相位 $\psi_s(t_s)$ 等于地面发射机 t_T ($t_T < t_s$) 时刻的相位 $\psi_T(t_T)$,即 $\psi_s(t_s) = \psi_T(t_T)$ ^[9]。对发射机相位进行积分,即可确定信号的发送时刻 t_T ,有

$$\int_{t_T}^{t_R} \dot{\psi}_T(t) dt = \psi_T(t_R) - \psi_T(t_T) \quad (1)$$

利用信号的收发时刻,可求出飞行器与地面站的单向距离 R ,有

$$R = \frac{c}{2} \cdot (t_R - t_T) \quad (2)$$

式中, c 为光在真空中的传播速度,有 $c = 299\,792\,458$ m/s。

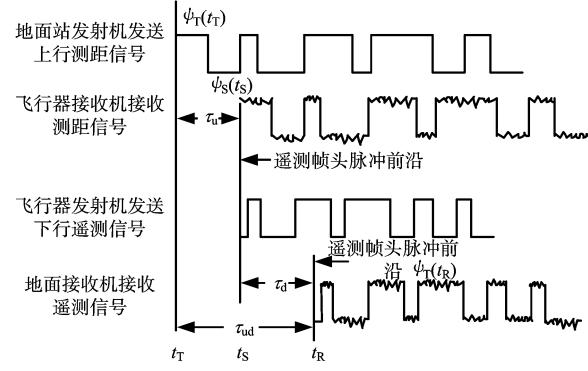


图 1 遥测测距原理图

1.2 遥测帧结构设计

遥测帧结构设计参考 CCSDS 标准,图 2 给出了遥测帧结构设计图,如图所示,帧结构由帧同步头(ASM)加遥测字的格式构成^[10],遥测帧连续传输形成遥测数据流,中间无间隙或中断。

帧同步头是位于遥测帧最前端的一组已知码组,将相邻遥测帧分开,根据 CCSDS 的建议无信道编码时可选择 32 bit 的帧头,用十六进制表示为 1ACFFC1D^[11],应注意的是,遥测帧头的选择根据遥测字长度和是否采用信道编码而不同,帧头的作用是辅助地面站进行帧同步,即地面站只有找到帧头才能按预定排列位置找到相应参数,对于遥测测距技术而言,重点是找到相位值 $\psi_s(t_s)$ 。遥测字由帧数据域和帧尾等结构组成,分别用来存储飞行器测得的数据和帧差错控制字等。本文的遥测字采用 CCSDS 建议的 1 784 bit 长度的帧结构,如图 2 所示,通常默认首位为零位,则码相位值 $\psi_s(t_s)$ 建议插入遥测字的第 128 位至第 159 位^[12]。由文献[3]可知,相位 $\psi_s(t_s)$ 为卷绕值,即 $\psi_s(t_s) \leq 1\,009\,470$,因此,至少需要 20 bit ($2^{20} = 1\,048\,576$) 的空间存储 $\psi_s(t_s)$ 的整数相位值,因此,建议第 128 位到第 147 位存储码相位 $\psi_s(t_s)$ 的整数值;剩余的 148 位到第 159 位则存储 $\psi_s(t_s)$ 相位的小数部分,假设一个 PN 码片宽度为 T s,则 $\psi_s(t_s)$ 的

量化精度可达到 $2^{-12}T$ s。帧结构的最后16位存储循环冗余码校验(CRC),旨在检查数据传输过程中可能引入的差错^[13],遥测字的其他位存储飞行器测得的其他科学数据或飞行器工作参数等相关信息。

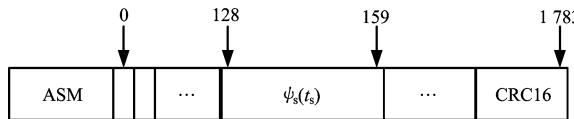


图2 遥测帧结构设计图

2 基于DTTL的符号同步算法

2.1 传统DTTL算法研究

符号同步的目的是跟踪遥测帧头的小数位偏移量,不妨定义该偏移量为 ϵ ,可知 ϵ 的取值为(0,1]。图3给出了现有基于DTTL的符号同步算法的原理框图。

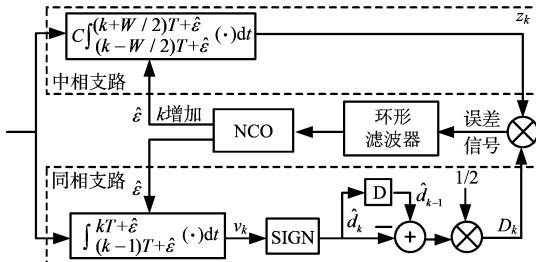


图3 基于DTTL的符号同步算法原理框图

如图所示,DTTL环由同相支路和中相支路构成,环路的输入信号为载波跟踪环的Q路输出^[8],有

$$\text{Im}[\tilde{y}(t)] = \sqrt{P_d} \varphi'_{\text{TM}}(t) + n'_s(t) \quad (3)$$

同相支路接收符号定时的估计值后对一个遥测符号周期进行判决,有

$$v_k \triangleq \frac{1}{T} \int_{(k-1)T+\hat{\epsilon}}^{kT+\hat{\epsilon}} \text{Im}[\tilde{y}(t)] dt \quad (4)$$

式中,T为一个遥测符号间隔, $\hat{\epsilon}$ 为符号定时偏移量的估计值。

式(4)的遥测符号流 v_k 为软符号估计,取符号函数(sign函数)后,得到±1遥测符号流,有

$$\hat{d}_k = \begin{cases} +1, & v_k > 0 \\ -1, & v_k < 0 \end{cases} \quad (5)$$

D_k 检测遥测符号是否发生了极性转换,通常定义符号极性由正到负跳变时 D_k 等于1,由负到正跳变时 D_k 等于-1,极性不发生变化时 D_k 等

于0,因此有

$$D_k \triangleq \frac{\hat{d}_{k-1} - \hat{d}_k}{2} \quad (6)$$

中相积分支路在两个相邻符号的WT/2区间内积分,有

$$z_k \triangleq C \int_{(k-W/2)T+\hat{\epsilon}}^{(k+W/2)T+\hat{\epsilon}} \text{Im}[\tilde{y}(t)] dt \quad (7)$$

式中:W为积分窗口宽度,有 $W=2^{-n}$,其中, $n \in \{0,1,2,3,4\}$;C为归一化因子,有 $C=1/(2\sqrt{P_d})$ 。中相积分支路得到符号定时的估计值。

鉴相器将同相积分支路的输出 D_k 与中相积分支路的输出 z_k 相乘,利用数据转换信息和当前数据消除遥测符号转换的影响,获得符号同步误差信号,此误差信号经环路滤波器滤波后去控制NCO,用以调整相位,缩小本地时间参考与接收遥测符号流的相对时延,从而实现同步。同步后,NCO输出的定时脉冲即为符号同步时钟输出。

2.2 加权系数的DTTL符号同步算法

传统DTTL算法通过对中相积分器相邻符号间积分提取误差信号,通过对同相积分器遥测符号间隔积分并判断是否发生极性跳变给出误差信号的极性,从而持续跟踪符号定时。但受采样离散化影响,符号跳变时必然存在倾角,且采样率越小,上升沿(或下降沿)的倾角越明显。传统DTTL算法忽略离散化对中相积分器的影响,因此,即使理想情况下该算法的性能效果也不佳。

基于加权系数的DTTL算法利用加权的思想,对每个遥测符号的首位、末位采样点加权处理后再进行积分,DTTL仍采用图3所示的结构,从而最大限度地减小符号跳变时离散采样的影响。文献[8]的思路正确,但公式推导中出现错误,下面对该算法进行重新表述。

算法处理对象为采样后的离散信号,假设一个遥测符号的采样点数为 N_s ,则符号定时偏移 ϵ 对应的采样点数为 $N_\epsilon = \lfloor \epsilon \cdot N_s \rfloor$,其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算;中相积分支路的归一化因子 $C = 1/(2 \cdot N_w \sqrt{P_d})$,其中 N_w 为积分窗口对应的采样点数,有 $N_w = W \cdot N_s$, P_d 为遥测信号功率, P_d 与总发射功率 P_t 及遥测信号调制度 φ_d 的关系为 $P_d = P_t \sin^2(\varphi_d)$;权重因子 $\alpha_\epsilon = \epsilon \cdot N_\epsilon - \lfloor \epsilon \cdot N_\epsilon \rfloor$ 。

该算法的具体步骤如下：

步骤 1：赋予定时偏移 ϵ 一个初始值 ϵ_k , ϵ_k 的取值区间为 $[0,1]$, 计算得到该值对应的 $N_\epsilon, \alpha_\epsilon$ ；

步骤 2：同相积分器和中相积分器利用步骤 1 得到的 $N_\epsilon, \alpha_\epsilon$, 对信号 $\text{Im}[\tilde{y}_i]$ 进行加权积分, 分别得到的 v_k, z_k :

$$v_k = \sum_{i=kN_s+N_\epsilon+1}^{(k+1)N_s+N_\epsilon} [(1-\alpha_\epsilon) \cdot \text{Im}[\tilde{y}_i] + \alpha_\epsilon \cdot \text{Im}[\tilde{y}_{i+1}]] \quad (8)$$

$$z_k = C \sum_{i=kN_s+\frac{N_w}{2}+N_\epsilon+1}^{kN_s+\frac{N_w}{2}+N_\epsilon} [(1-\alpha_\epsilon) \cdot \text{Im}[\tilde{y}_i] + \alpha_\epsilon \cdot \text{Im}[\tilde{y}_{i+1}]] \quad (9)$$

步骤 3：同相积分器提取缓存里的 v_{k-1} , 计算第 k 个遥测符号与第 $k-1$ 个符号是否发生了极性跳变：

$$D_k = \frac{1}{2} [\text{sign}(v_{k-1}) - \text{sign}(v_k)] \quad (10)$$

步骤 4：鉴相器将 D_k, z_k 相乘, 得到第 k 个符号间隔的鉴相误差：

$$\Delta\epsilon_k = D_k z_k \quad (11)$$

步骤 5：环路滤波器采用二阶结构, 利用 $\Delta\epsilon_k$ 和缓存里的 $\Delta\epsilon_j$ ($1 \leq j < k$), 求出下一遥测符号定时 ϵ_{k+1} 的估计值：

$$\epsilon_{k+1} = \epsilon_k + K_1 \Delta\epsilon_k + K_2 \sum_{j=1}^k \Delta\epsilon_j \quad (12)$$

式中, K_1, K_2 为环路增益系数。

步骤 6：NCO 将 ϵ_{k+1} 传到中相积分支路和同相积分支路, 并重复上述步骤, 直到 DTTL 跟踪上遥测符号定时。

3 理论分析和仿真验证

3.1 误差分析

基于加权系数的 DTTL 算法对同相积分器和中相积分器进行加权, 消除符号跳变的影响。文献[1]给出了 DTTL 符号同步误差表达式, 有

$$\text{var}(\Delta\epsilon) \geq \frac{WB_L}{2S_L P_d / N_0} \text{ sym}^2 \quad (13)$$

式中, W 为窗口分数, B_L 为环路带宽, P_d/N_0 为遥测信号与噪声信号的功率比, S_L 为平方损失。其中, 平方损失为中相积分器和同相积分器两个

误差信号相乘时造成的误差, 其数学表达式为

$$S_L = \frac{\left[\text{erf}(\sqrt{R_s}) - \frac{W}{2\sqrt{\pi}} \exp(-R_s) \right]^2}{1 + \frac{WR_s}{2} - \frac{W}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-R_s} + \sqrt{R_s} \text{erf}(\sqrt{R_s}) \right]^2} \quad (14)$$

式中: $R_s = P_d T_s / N_0$, 其中 T_s 为一个遥测符号的宽度(单位:s); $\text{erf}()$ 为误差函数; $\exp()$ 为指数函数。 S_L 由两个误差信号的乘积得到, 其对噪声十分敏感, 即信噪比越低, S_L 越大。低信噪比条件下, $R_s \ll 1$, 对误差函数和指数函数进行近似替换, 有: $\text{erf}(\sqrt{R_s}) \approx 2\sqrt{R_s/\pi}$, $\exp(-R_s) \approx 1 - R_s$ 。将近似函数代入式(14)并化简, 有

$$S_L \approx \frac{4R_s}{\pi} \left[1 - \frac{W}{4} \right]^2 \left[1 - \frac{W}{2\pi} \right]^{-1} = f(W)R_s \quad (15)$$

式中, $f(W) = 4/\pi \cdot [1-W/4]^2 \cdot [1-W/2\pi]^{-1}$ 。将式(15)代入式(13)中, 可得到低信噪比情况下 DTTL 的符号同步误差, 有

$$\begin{aligned} \text{var}(\Delta\epsilon) &\geq \frac{WB_L}{2f(W)R_s(P_d/N_0)} = \\ &\frac{WB_L}{2f(W)T_s(P_d/N_0)^2} \text{ sym}^2 \end{aligned} \quad (16)$$

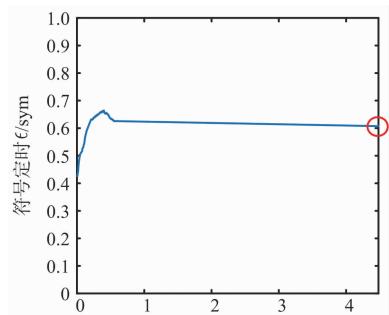
高信噪比条件下可忽略 S_L 的影响, 即 $S_L \approx 1$, 因此, DTTL 的符号同步误差为

$$\text{var}(\Delta\epsilon) \geq \frac{WB_L}{2P_d/N_0} \text{ sym}^2 \quad (17)$$

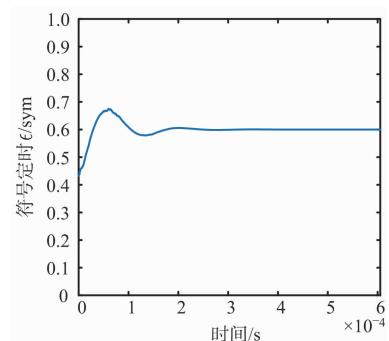
3.2 仿真验证

对上述算法进行仿真实现, 遥测帧采用 2.2 节设计的 1816 比特长度的帧结构(含 32 比特帧头), 不采用信道编码, 遥测符号的传输速率 R_s 为 100 ksps(symbol per second), 每个遥测符号取 30 个采样点, 信号调制度 φ_d 为 0.4π , 遥测符号定时偏移量设为 0.6 个符号, 中相积分窗口设为 $1/4$, 不加噪声, 其中, 环路滤波器增益系数 K_1 取 0.043, K_2 取 9.245×10^{-4} ^[14], 窗口分数 W 取 0.25, 图 4 给出了无噪声条件下两种 DTTL 算法的符号同步跟踪性能图。如图所示, 传统 DTTL 算法在理想条件下仍存在较大的定时误差, 相比而言, 基于加权系数的 DTTL 算法能平稳跟踪符号定时, 蒙特卡罗仿真 500 次, 该算法的均方根误差约为

8.375×10^{-6} 个符号, 符号速率为 100 ksps 时相当于 0.01 ns 量级。



(a) 传统 DTTL 算法符号同步性能图



(b) 基于加权系数的 DTTL 算法符号同步性能图

图 4 无噪声条件下两种 DTTL 算法的符号同步跟踪性能图

进一步对算法不同信噪比条件下的性能进行验证。信噪比区间取 -10 dB 至 50 dB , 步长为 3 dB , 蒙特卡罗各仿真 500 次, 图 5 给出了不同信噪比时基于加权系数 DTTL 算法的符号同步性能图。如图所示, 该算法在载噪比为 40 dB-Hz (即信噪比为 -10 dB) 时, 符号定时均方根误差约为 0.06 个符号; 在载噪比约为 45 dB-Hz (对应信噪比为 -5 dB) 时, 符号定时均方根误差与传统 DTTL 算法理想

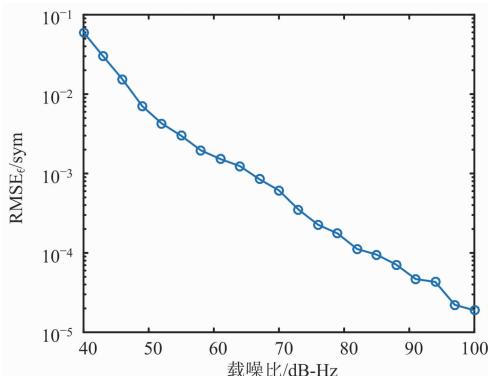


图 5 不同信噪比条件下加权 DTTL 算法的符号定时性能图

条件下的性能相当, 均方根误差约为 0.01 个遥测符号; 在载噪比约为 80 dB-Hz (对应信噪比为 30 dB) 时, 均方根误差优于 10^{-4} 个遥测符号。地面站通常采用增大天线口径等措施提高接收信号的信噪比, 因此, 算法的精度能符合遥测测距的需求。

4 结束语

本文研究了一种基于加权系数的 DTTL 符号同步算法, 该算法消除了现有 DTTL 算法同步性能较差的难题, 在信噪比为 -5 dB 时能达到传统 DTTL 算法理想条件下的跟踪性能, 约为 0.01 个遥测符号, 在信噪比为 30 dB 时, 符号定时均方根误差优于 10^{-4} 个遥测符号, 保证了工作精度, 适合遥测测距技术。

但是, 本文的环路误差分析建立在输入信号载波跟踪良好的前提下, 即载波跟踪不存在误差, 对载波跟踪-DTTL 级联环路进行误差分析将是下一步进行改进和提高的方向。

参考文献:

- [1] ANDREWS K, HAMKINS J, SHAMBAYATI S, et al. Telemetry-Based Ranging[C]// Proceedings of the 2010 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA: IEEE, 2010: 1-16.
- [2] HENNAWY J, ADAMS N, SANCHEZ E, et al. Telemetry Ranging Using Software-Defined Radios[C]// Proceedings of the 2015 IEEE Aerospace Conference , Big Sky, MT, USA: IEEE, 2015: 1-14.
- [3] HAMKINS J, KINMAN P, XIE H, et al. Telemetry Ranging: Concepts [R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2015.
- [4] 马宏, 彭保童, 张超. 基于 simulink 的再生伪码测距关键技术实现[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 151-156.
- [5] 李艳华, 李凉海, 谌明, 等. 现代航天遥测技术(下)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2018: 983-987.
- [6] 罗亨, 齐建中, 王乐, 等. 一种新型的可编程遥测收发机设计[J]. 无线电工程, 2018, 48(9): 727-731.
- [7] 王勇. 一种适用于数字卫星接收机的位同步系统的研究与实现[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2010.

(下转第 62 页)