

科学衛星のための衛星時刻校正システムの整備

岡田 尚基^{*1} 山本 幸生^{*1}

Development of Spacecraft Time Calibration System for Science Spacecrafts

Naoki OKADA^{*1}, Yukio YAMAMOTO^{*1}

Abstract

Science spacecrafts have a spacecraft clock which indicates the time of command execution and telemetry data generation. In many cases, it is a counter which is incremented using onboard clock. Because it is a spacecraft specific time scale and its rate of increase is not constant, we have to calibrate it to a common time scale. We develop a time calibration framework for our future science spacecrafts in ISAS/JAXA. We will incorporate this common framework into our ground systems from spacecraft operations to telemetry data analyses.

Keywords: time calibration, spacecraft clock, system development

概 要

科学衛星や探査機では、コマンドの実行時刻やテレメトリデータの生成時刻を扱うための時刻系として、衛星時刻が使われる。衛星時刻は、オンボードのクロックを使って増加するカウンタであることが多い。衛星時刻はその衛星・探査機に固有の時刻系であり、かつ進み方も一定ではない。そのため、これを共通の時刻系に校正して使うことが行われる。我々は、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所で科学衛星・探査機の時刻校正に適用する枠組みを整備している。この枠組みは、今後打ち上げられる科学衛星・探査機で、衛星運用からデータ解析に至るまでの各地上系システムに共通機能として組み込まれる予定である。

1 はじめに

科学衛星・探査機（以下、衛星）では、衛星時刻によってコマンドの実行時刻やテレメトリデータの生成時刻を管理している。宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所では衛星時刻のことを Time Indicator(TI) と呼ぶ。TI は多くの衛星で、内部のクロックを使ってカウントアップする一つの固定長カウンタとなっている。TI は衛星内のデータ処理装置で作られて、各機器に配信される。TI の増加する速度（レート）は一定ではなく、温度等の要因により変化する。そこで、定期的に TI と標準的な時刻系を対応付けることで時刻を校正し、かつ絶対時刻で扱えるようにすることが必要である。

この時刻校正のために、衛星は時刻テレメトリというテレメトリデータを送るようになっている。時刻テレメトリには、あるフレーム（TI ラッチフレーム）が衛星内のデータ処理装置から送信機に出力された瞬間の TI 値（時刻テレメトリ TI）がラッチされ、そのフレームを特定するための情報と共に格納されている（図 1）。一方、地上の受信局で受信した

^{*1} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 科学衛星運用・データ利用センター 科学データ利用促進グループ
(Space Science Data Archive Promotion Group, Center for Science Satellite Operation and Data Archive, Institute of Space and Astronautical Science(ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA))

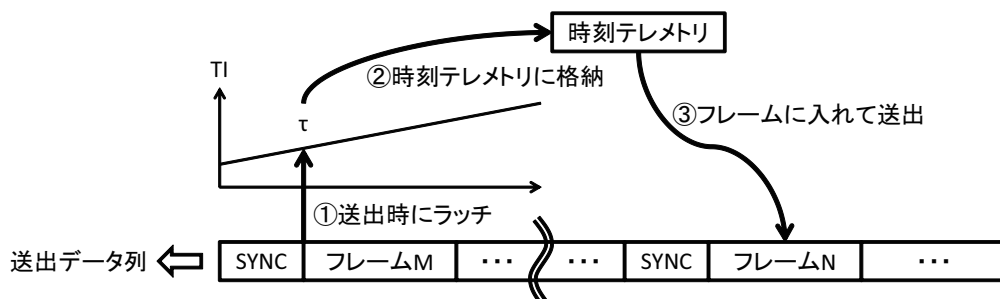


図1 時刻テレメトリの仕組み

テレメトリデータにはフレームごとにその受信時刻が協定世界時 (UTC: Coordinated Universal Time) で付けられるため、時刻テレメトリを使えば衛星送出時の TI と地上受信時の UTC の対応付けができる。後は、衛星送出時のラッチから地上受信時刻を付けるに至るまでの各種遅延を補正すれば、校正用の TI-UTC のペアを作ることができる。こうして作成した TI-UTC ペアを校正表にして用意しておけば、補間により任意の時点での TI と UTC の相互変換を行える。これが、時刻テレメトリを使用した衛星時刻校正の仕組みである。

TI のビット長や分解能は衛星により個別に定義されるが、この仕組みは共通である。従って、時刻について特別に高い精度要求がなければ、衛星ごとに時刻校正処理を用意する必要はない。また、データ解析をする上で、個別に異なる時刻校正処理が作られることにより、一つのデータに異なる時刻が付くことは望ましくない。宇宙科学研究所では従来、テレメトリデータの収集・配布を行う各システムで時刻校正を行ってきたが、システムごとに個別で実装されていたため、処理方式が異なっていた。また、その処理内容についても十分に明らかになっていない箇所があり、利用者がどの程度信頼して使用して良いものなのか判断できなかった。そこで現在、宇宙科学研究所で使う衛星時刻校正の共通フレームワークとして衛星時刻校正システムの整備を行っている。

2章ではまず、衛星時刻校正システムの全体像について述べる。3章で時刻校正処理について詳しく述べ、4章で時刻精度に関する考察結果についてまとめる。最後に、5章でまとめとこれからの整備方針について記す。

2 システム概要

衛星時刻校正システムの全体像を図2に示す。システムは、時刻校正表作成処理とパケット時刻校正処理からなる。

時刻校正表作成処理では、時刻テレメトリと TI ラッチフレーム、そして衛星-地上局間電波伝搬遅延補正のためにアンテナ予報値を入力し、衛星ごとの時刻校正表を出力する。この処理は衛星運用中に実行され、TI-UTC ペアを1レコードずつ追記していく。パケット時刻校正処理では、時刻校正表とうるう秒の挿入時刻が書かれたうるう秒ファイルを使い、各パケットの Time Code Field に格納された TI (パケット TI) を UTC に校正する。パケット時刻校正処理を行うためのプログラムはライブラリとして提供しているため、利用者は自身の環境にこのライブラリをインストールし、時刻

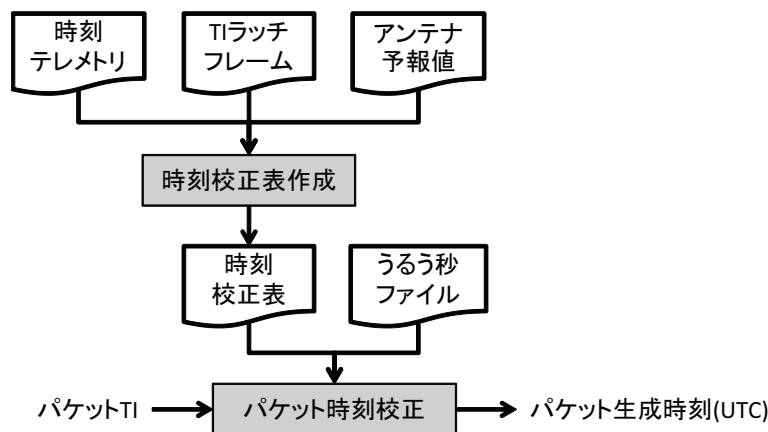


図2 システム概要

校正を行うことができる。衛星時刻を扱う上では、カウンタのロールオーバーやリセットに注意が必要である。衛星時刻は現在、約4.25年でロールオーバーする設計となっているものが多く、そのほとんどがこの期間を超えて運用している。また、コマンドやデータ処理装置の再立ち上げでリセットすることもある。

すなわち、衛星のライフスパンの中で、繰り返し同じ TI 値が現れることになり、このような場合 TI 値だけを見ても一意に UTC への変換が行えない。これを解決するため、本システムでは TI に上位桁を追加した Extended TI (ETI) を考える。カウンタのロールオーバーやリセットにより TI が不連続になったときに、追加した上位桁の部分 (ETI 拡張部) をインクリメントすることで (図3)、ETI は衛星のライフスパンを通じて一意な値をもった衛星時刻として扱うことができる。

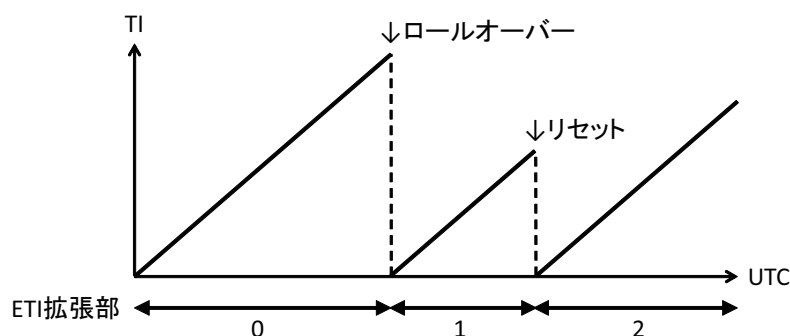


図3 ETI 拡張部のインクリメント

衛星のライフスパンには、地上試験期間も含まれる。地上試験で出力されるデータは、不具合調査やデータの校正に役立つために保管しておくからである。地上試験データまで含めて一意の衛星時刻が割り当てられるよう、ETI 拡張部の最上位ビットはフライトデータと地上試験データを区別するフラグとして使用する。

なお、本システムを適用するためには、衛星時刻の管理について以下の条件を満たしている必要がある。

1. テレメトリ形式が Consultative Committee for Space Data Systems(CCSDS) の定める Space Packet[1] に準拠していること
2. 衛星時刻校正用に時刻テレメトリを用いていること
3. 各パケットの Time Code Field 及び時刻テレメトリの衛星時刻が、ある時点のエポックとする非分割のカウンタ (CCSDS Unsegmented Time Code(CUC) Level 2[2] 相当) であること

3 時刻校正の処理

3.1 時刻校正表の作成

3.1.1 時刻テレメトリの収集

時刻校正表を作るために、まずは時刻テレメトリを収集する。ただし、本システムでは衛星からの時刻テレメトリの送出間隔にかかわらず、基本的にはパスの先頭と末尾の二つの時刻テレメトリを収集する。また、深宇宙探査機ではパスが長時間に及ぶため、パスが1時間以上継続する場合には1時間ごとに時刻テレメトリを収集する。これは、校正表のレコード数と時刻精度のバランスを考慮した標準値であり、時刻精度要求に従って衛星ごとに収集間隔は変更できる。こうして収集した時刻テレメトリから TI ラッチフレームを探すことにより衛星送出時 TI と地上受信時 UTC の対応が得られる。

3.1.2 計測タイミングの補正

宇宙科学研究所の衛星・地上システムでは、フレームの先頭で時刻を計測するか、フレームに付けられている同期コードの先頭で時刻を計測するかという点で、衛星送出時の TI ラッチタイミングと地上受信時の受信時刻計測タイミングが異なっている（図 4）。同期コードの長さ、及び通信のビットレートによってこのタイミングのずれは求められるので、これらの情報を使い計測タイミングのずれを補正する。

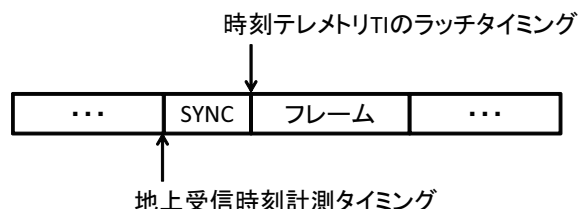


図 4 時刻計測タイミングの違い

3.1.3 電波伝搬遅延補正

衛星送出から地上受信までの遅延の主たる要因は衛星－地上局間の電波伝搬遅延である。この遅延量を求めるには、衛星－地上局間の距離（ダウンリンクレンジ）を知る必要がある。ダウンリンクレンジとしては実測値が最も正確と考えられるが、実際には必要な時刻の実測値がないことが多い。実測値から求めた軌道の確定値は、利用可能になるまでに時間がかかるため、衛星運用中にリアルタイムで使用されることをユースケースに含んでいる本システムでは間に合わない。そこで、本システムでは衛星運用時に確実に取得できるアンテナ予報値を用いる。アンテナ予報値には軌道予測を基に作られた、ある時刻での電波のダウンリンクレンジの予測値が、一定間隔で記載されている。TI ラッチフレームの地上受信時刻におけるダウンリンクレンジをこのアンテナ予報値から 2 次補間で求め、真空中の光速で除して電波伝搬遅延時間とする。これを受信時刻から差し引いて、TI-UTC ペアを作成する。アンテナ予報値の使用については、通常時は後述する時刻精度が得られるため問題ないと考えられるが、軌道が大きく変わる運用を行う場合には注意が必要である。

3.1.4 時刻校正表への記載事項

時刻校正表には以上で求めた TI-UTC ペアをレコードとして追記していく。このとき、各レコードには直前のレコードとの間で計算した TI の増加速度（レート）、及び ETI 拡張部、それに時刻校正に関する補足情報も含める。補足情報には上述の補正に用いたビットレートやダウンリンクレンジの他、本システムでは補正に使用しないが、地上受信局名と通信バンド帯も含めている。これらの補足情報は、後で各レコードの精度について評価するための判断材料として使えるほか、衛星プロジェクト側でさらに精度の高い時刻校正を行う際に有用と考えられる。

3.2 パケット時刻の校正

時刻校正表を用いて、各パケットのパケット TI を UTC に校正する。これは校正対象の TI の前後の TI-UTC ペアからの 1 次補間により計算される。時刻校正表の最終レコード以降の TI が校正対象の場合は、末尾の 2 レコードからの 1 次補間となる。

この変換を行うプログラムはライブラリとして提供している。ライブラリには特定のエポックからの経過秒を介して、衛星時刻と UTC を相互変換する関数が用意されている（図 5）。TI にはロールオーバーやリセットによる値の重複があり得るため、衛星時刻としてはパケット TI だけだと情報不足である。そのためにライブラリではパケット TI に加え、

方法 1 パケット TI 付近と考えられる UTC（予想周辺時刻）を指定する方法

方法 2 ETI 拡張部を指定する方法

の 2 種類の方法で変換できるようになっている。各パケットの ETI は、テレメトリデータのアーカイブを行うシステム

である SIRIUS で作成する。SIRIUS では、テレメトリデータの受信時刻を参考にして方法 1 を使った時刻校正を行い、ETI 拡張部を作成する。これにより、SIRIUS からパケットを取得した場合にはパケットの付加情報としてこの ETI が得られるため、方法 2 を使った時刻校正ができる。なお、ライブラリはうるう秒ファイルを読み込むことでうるう秒の挿入に対応しており、うるう秒を 60 秒として出力する。

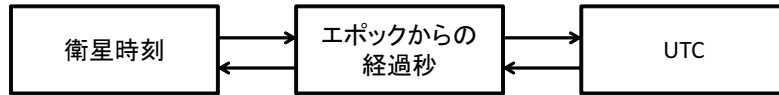


図 5 ライブラリ関数による時刻変換イメージ

4 時刻校正の精度

本システムを使用した場合の時刻校正の精度は、TI-UTC ペアの精度とそれを用いた 1 次補間の精度により決まる。

TI-UTC ペアを作成する際に考慮しなければならないのは、TI 及び UTC の時刻計測精度と、各時刻計測間の回線・処理遅延量である（図 6）。これらについては、衛星・地上局による違いはあるものの概ね表 1 に示したオーダーの誤差を有する。この表から、TI-UTC ペアの時刻精度は 1msec オーダーと言える。

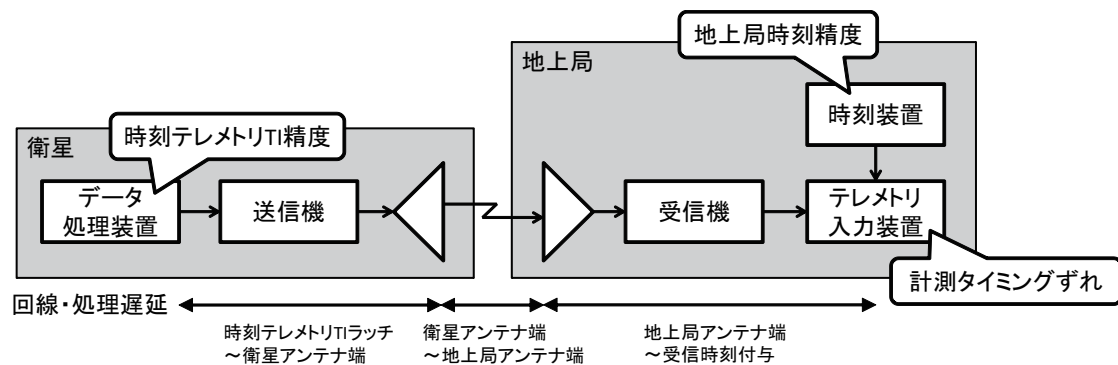


図 6 TI ラッチから受信時刻付与までの流れと時刻精度への影響箇所

表 1 TI-UTC ペア作成における時刻誤差オーダー

項目	誤差オーダー ^{*1}
時刻テレメトリ TI 精度	1msec
地上局時刻精度	1msec
計測タイミングずれ	0 (1sec)
時刻テレメトリ TI ラッチ～衛星アンテナ端 回線・処理遅延	1msec
衛星アンテナ端～地上局アンテナ端 電波伝搬遅延	1msec (1min)
地上局アンテナ端～受信時刻付与 回線・処理遅延	0 ^{*2}

^{*1} 括弧内は本システムによる補正前の誤差オーダー

^{*2} 上流のテレメトリ入力装置にて補正済み

1 次補間による誤差は、TI-UTC ペアの作成間隔と、その間のレートの変化量によって決まる。レートは主にデータ処理装置の温度に依存するため、衛星の軌道や運用方法により変化の仕方が異なる。いくつかの地球周回衛星で定常運用時のレートの最小値・最大値を調査したところ、どれも 1 時間当たり 10msec オーダーの違いを生む差があった。定常的

に運用される温度範囲内で、水晶発振器を用いて得られる時刻精度は、他の衛星でも同様の結果になることが予想される。

以上より、本システムの時刻校正精度は、TI-UTC ペアの作成間隔を 1 時間とすると概ね 10msec のオーダーであると言える。多くの衛星でパケット TI の分解能が 10msec オーダーであることから、この精度は利用者の要求を満たすものと考えられる。ただし、さらに高い時刻精度が必要な場合には、本システムを使う際に時刻テレメトリの収集間隔を短く設定するか、衛星プロジェクト側で高精度な時刻校正を行う仕組みを用意する必要がある。

5 おわりに

本稿では今後、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所で打ち上げられる衛星に対して適用する、時刻校正のフレームワークについて紹介した。衛星の時刻管理方式について特定の条件を満たせば、その衛星で時刻校正システムを使用することができ、衛星運用からデータ解析に至る宇宙科学研究所の共通的な地上系システムを利用することができる。

一方で、ASTRO-H や小型科学衛星では、従来とは異なる衛星時刻管理方式が採用されることが決まっている。これらの衛星では、時刻テレメトリを使った時刻校正が行える点で仕組みは従来方式と同じだが、衛星時刻について GPS 信号の利用を想定した設計となっているために、時刻テレメトリ TI のフォーマットが異なるなどの差異があり、本システムをそのまま適用することができない。今後はこの方式を採用した衛星が複数打ち上げられることになるため、衛星共通の地上系システムを構築するために、本システムを ASTRO-H/ 小型科学衛星の方式にも適用できるよう改修することが望まれる。

参考文献

- [1] CCSDS, Space Packet Protocol, Issue 1, September 2003.
- [2] CCSDS, Time Code Formats, Issue 3, January 2002.