

次期科学衛星テレメトリデータベースに関する検討

岡田 尚基^{*1}, 山本 幸生^{*1}

Concept for Next-Generation Science Satellite's Telemetry Database

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

Abstract

In ISAS/JAXA, telemetry data generated by science satellites are stored in telemetry database system called SIRIUS. SIRIUS provides these data for satellite project's users who process and analyze them. The first target of this system was NOZOMI which took the first step toward CCSDS-compliant telemetry in ISAS. Since its development, we have fixed it over and over to adapt each satellite's telemetry and satisfy user requirements. In this report, we introduce the situation of current system, and describe the concept for next-generation system.

Keywords: telemetry database, space packet

概要

JAXA 宇宙科学研究所では、科学衛星・探査機から得られるテレメトリデータを SIRIUS と呼ばれるデータベースシステムに格納し、データ処理・解析を行う衛星プロジェクトユーザへ提供している。現在稼働している SIRIUS は CCSDS 勧告のテレメトリデータへの段階的な準拠を開始したのぞみを格納対象に開発され、その後機能改修を重ねながら今日に至っている。本稿では、現在の SIRIUS について紹介した後、本システムの抱える課題と検討中の将来像について述べる。

1 はじめに

人工衛星や探査機といった宇宙機（以下、単に衛星）と通信できる場所・時間は限られている。そのため衛星は各機器から定常的に生成されるデータをデータレコーダに記録しておき、地上局とリンクが確立した際にそれらをまとめて送信する。したがって、衛星からのテレメトリデータは複数の地上局（アンテナ）で受信され、各々には様々なタイミングで作成された複数機器のデータが混在することになる。場合によっては、同じデータが異なる経路で取得されることもある。テレメトリデータを処理・解析するためには、それらを一元的に収集し、地上受信時刻ではなく機上生成時刻でデータを検索、取得できるシステムが必要となる。JAXA 宇宙科学研究所 (ISAS) では、SIRIUS と呼ばれるテレメトリデータベースシステムがこの役割を担っている (図 1)。SIRIUS には 1975 年打ち上げのたいように始まり現在に至るまで、数十に及ぶ衛星のデータが格納されており、これは一つのシステムが扱う衛星の数としては世界でも最大規模である。本稿では、この SIRIUS の現状と将来構想について紹介する。

2 章ではテレメトリデータ形式について説明し、テレメトリデータベースの用途に関する考察を行う。次に 3 章で現在のシステムの紹介を行う。その後、4 章で現在のシステムの抱える課題を挙げ、5 章で将来システムに関する構想について述べる。

^{*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, ISAS, JAXA)

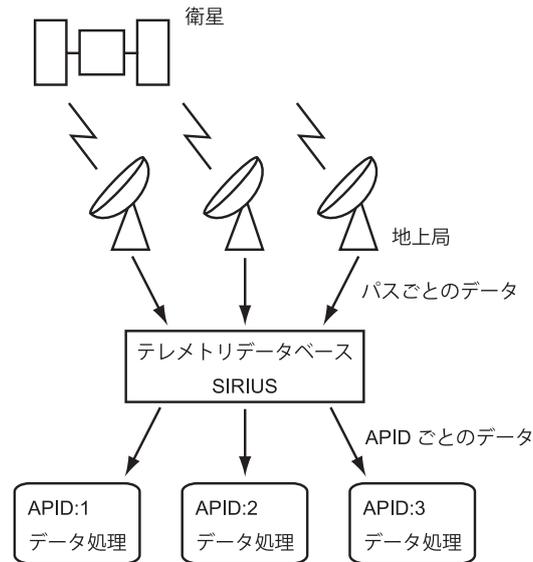


図1 テレメトリデータの流れ

2 テレメトリデータベースの意義と役割

2.1 テレメトリデータの形式と流れ

SIRIUS 自身について説明する前に、SIRIUS で扱うテレメトリデータについて簡単に触れておく。衛星のテレメトリデータ形式については CCSDS(Consultative Committee for Space Data Systems) で標準化されており、近年の ISAS 衛星では Space Packet Protocol [1] 及び AOS(Advanced Orbiting System) Space Data Link Protocol [2] が使われている。これらのプロトコルではそれぞれ Space Packet (以下、パケット)、AOS Transfer Frame (以下、フレーム) というデータ形式が定義されている。

パケットはユーザアプリケーション間の通信に用いられるデータの単位である。パケットのデータ部は可変長で、ヘッダ部には主に以下の情報が含まれている。

APID (Application Process Identifier)

パケットの識別子。衛星内の機器・データ種の識別に用いられる。

Packet Sequence Count

パケットの生成順序を表す APID ごとのカウンタ

Packet Data Length

パケットのデータ長

Time Code Field

パケットの生成時刻情報。ISAS 衛星では一定間隔でカウントアップする TI (Time Indicator) カウンタが格納されることが多い。

パケットのヘッダはプライマリヘッダという必須部分と、省略可能なセカンダリヘッダに分かれている。上記の項目では Time Code Field のみがセカンダリヘッダに含まれている。

フレームは衛星 - 地上局間の通信に用いられるデータの単位である。各機器から出力されたデータはパケットの形で収集され、フレームに詰め込まれた後、通信路符号化が施され地上に送られる。微弱な信号でも通信を容易にするため、フレームは固定長になっている。可変長のパケットは固定長のフレームに格納するために分割・結合されるのである (図2 機上部)。フレームのヘッダ部には主に以下の情報が含まれている。

Spacecraft ID

CCSDS により割り当てられる衛星の識別番号

VCID (Virtual Channel ID)

仮想的な通信路の識別子。近年の ISAS 衛星ではリアルデータと再生データを区別するために使われることが多い。

Virtual Channel Frame Count

VCID ごとの送信順序を表すカウンタ

地上局で受信されたテレメトリデータにはフレームごとに受信時の情報が付加情報として加えられる。付加情報には主に以下の情報が含まれている。

衛星番号 ISAS が割り当てた衛星の識別番号

受信時刻 フレームの受信時刻

受信アンテナ ID 地上局の識別番号

受信バンド帯 受信信号のバンド帯

ビットレート 受信信号のビットレート

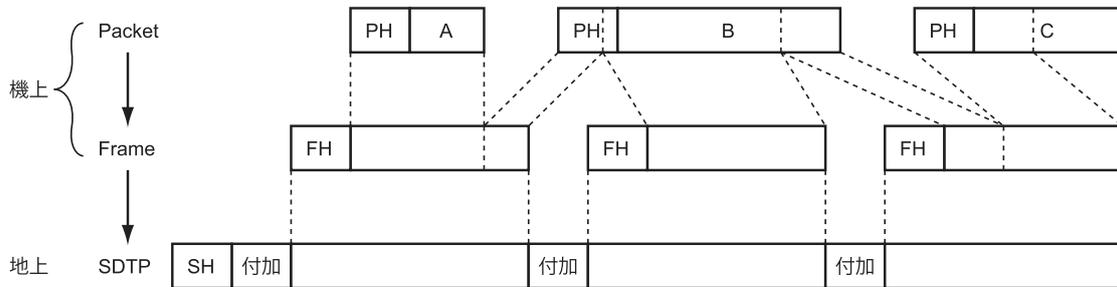
パス番号 パスの識別番号

復調装置ステータス 復調時の誤り訂正に関するフラグ

ロックステータス 受信時のロック状態

SIRIUS 付加情報 SIRIUS においてパケット生成時刻などを付加するための領域

地上局から SIRIUS のある ISAS 相模原キャンパスまでのデータ転送は、付加情報等が付けられたフレームを複数連結したものをひとかたまりのデータとして行われる (図 2 地上部)。このデータ転送には転送のタイミングによって SDTP (Space Data Transfer Protocol) [3] もしくは FTP が用いられる。SDTP は地上局間でテレメトリデータ転送を行うために用意された ISAS 独自のプロトコルで、CCSDS の SLE (Space Link Extension) と相互変換が可能になっている。SDTP はフレームだけではなく任意のデータ転送に使うことができ、SIRIUS からのパケット形式のデータ提供にも SDTP を使っている。



PH: Packet Header, FH: Frame Header, SH: SDTP Header, 付加: 付加情報等

図 2 テレメトリデータ形式概略

2.2 システム用途

SIRIUS に格納されたデータは主に、衛星で取得した科学・工学データの解析のために用いられる。パケットに含まれるデータは、キャリブレーションを行って物理量に変換しなければ意味を持たない。キャリブレーションを適切に行うことができるのは機器の開発チームだけであるため、SIRIUS の利用者は衛星プロジェクトの限られたメンバーである。この用途においては、各自が解析に必要な機器のデータのみをデータが作られた特定の期間ごとに取得できる必要がある。また、データ処理ではキャリブレーション手法が改良された場合に全データの一括再処理が行われることもあり、過去のデータを保管しておくアーカイブとしての機能も重要となる。

テレメトリデータは、地上局受信時の通信障害や、機上での宇宙線の影響によりデータの欠けや異常が起こることがある。場合によっては機器の故障も考えられるため、データ処理においてデータに不具合が見つかった際には、地上受信時の状態にまでさかのぼって調査が行われる。各データの由来を調べられることもシステムに求められる重要な機能である。

3 現在のシステム

ISAS では 1998 年に打ち上げられたのぞみから、段階的にテレメトリデータの CCSDS 勧告への準拠が始まった。のぞみではパケットが固定長になっているなどパケット形式の持つ柔軟性を制限した形での採用であったが、その後の衛星で段階的に改良されて現在に至っている。その流れに合わせ、現在の SIRIUS はのぞみのデータ格納を目指して 1996 年から開発され、後にそれ以前の衛星のデータについても移行された。この開発ではハードウェアもそれまでの大型計算機から Solaris サーバへ変更されている。

3.1 システム規模

現在、SIRIUS では運用が終了している衛星を含めると 27 の衛星のテレメトリデータを扱っている。最も古い衛星は 1975 年打ち上げのたいようである。システムの保持するデータ量は以下に説明する局別データ・マージデータを併せて 2011 年 7 月時点で 17.7TB あり、運用中の衛星のデータが毎月約 100GB ずつ追加されている。

3.2 機能

SIRIUS の目的は、重複を除き生成時刻順にソートされたテレメトリデータをユーザへ提供することである。この時刻ソート済みデータをマージデータと呼んでおり、マージデータ作成前に衛星の 1 可視（パス）ごとに登録されるデータを局別データと呼んでいる。マージデータは 1 日単位で作成される。当初の開発以来、SIRIUS へのデータ登録は SIRIUS 運用者がデータ内容を目視で確認しながら行っていたが、2010 年 10 月末より、例外データをルール化し異常がなければ自動で登録できるように改修を行った。改修前はマージデータを全てのデータが揃ってから一括作成していたために、マージデータが利用できるまでに数日かかっていたが、改修を機に作成方法を見直し、データが届くたびにその時点で存在するデータを使ってマージデータを作成するように変更した。これにより衛星運用後 1 時間程度で、受信したデータをマージデータとして取得可能になっている。

マージデータの作成においては、以下に示す 3 つの処理が行われる。

3.2.1 ETI カウンタ作成

パケットの生成時刻を表す TI カウンタは、いずれ割り当てられた全ビットを使い切り 1 周する。多くの ISAS 衛星でその周期は 5 年程度である。1 周した TI カウンタはそのままでは 1 周前の TI カウンタと区別が付けられない。そこで、SIRIUS では TI カウンタの上位桁を拡張した ETI (Extended TI) カウンタを各パケットに対して作成し、TI カウンタのロールオーバー時に拡張部分へ繰り上がるようにしている。これにより、衛星の全運用期間について ETI カウンタの値が一意に定まるようになる。

3.2.2 時刻付け

TI カウンタは単なるカウンタであるため、各パケットに含まれる TI カウンタの値がどの時刻にあたるのか変換する必要がある。TI カウンタと時刻 (UTC) との対応には時刻パケットという専用のテレメトリデータを使用する。時刻パケットにはあるフレームが衛星から送出されたタイミングの TI カウンタと、そのフレームを特定するための情報が含まれている。一方、各フレームには地上受信時に受信時刻が付けられ、そこから衛星 - 地上局間の電波伝搬等に要した遅延量を差し引くことで、衛星からのフレームの送出時刻が推定できる。これらの情報から TI カウンタと時刻の対応が求められるのである。SIRIUS ではこの対応を使い、全パケットにそのパケットの生成時刻を表す UTC 時刻を付加する、時刻付けという処理を行っている。

3.2.3 ソート・重複除去

時刻ソートには前述の ETI カウンタを使用する。このとき、ETI カウンタの値が同じデータについてはパケットのプライマリヘッダをキーにソートされる。ETI カウンタもプライマリヘッダも同じデータはパケット形式においては同一のデータであると判断されるため、あらかじめ決められた優先度に従って一方を除去することで重複のないマージデータが作成される。

3.3 インタフェース

SIRIUS からのテレメトリデータの提供には SDTP が使われる。ユーザはこのプロトコルでの通信用に用意された C 言語のライブラリ関数を各自のプログラムから呼び出すことになる。この関数で指定できる主なパラメータは衛星番号、受信アンテナ番号、受信バンド帯、データ形式 (パケット、フレーム)、VCID、APID、時刻範囲である。SIRIUS からのマージデータ取得用には特別な受信アンテナ番号、受信バンド帯、VCID が割り当てられており、ユーザは通信路を意識することなくマージデータを取得できる。なお、時刻付けの結果は SDTP のヘッダ部に格納され提供される。

4 現行システムの課題

現在の SIRIUS は、ハードウェアの性能向上による検索・提供の高速化、登録方式の改修による運用からマージデータ提供までのタイムラグの短縮といった理由により、ユーザが従来持っていた性能面の不満は大きく解消されている。しかし、

開発以来改修を積み重ねてきた現システムはブラックボックス化が進み、運用・改修において不具合の発生が目立つようになってきている。以下では、保守性・機密性・トレーサビリティの観点から現在の SIRIUS が抱える主な課題について述べる。

4.1 保守性

SIRIUS はデータベースであり、常に整合性の取れたデータを提供するために、適切なトランザクション管理を行う必要がある。データの整合性を維持するための排他制御や、処理が中断した場合のロールバックが誤りなく行われなければならないのである。現在の SIRIUS はこれらのトランザクション管理を全て独自に作り上げている。これはシステムとしては柔軟な対応が可能になる一方で、よほど注意深く設計、実装しなければ思わぬ不具合を生む可能性がある。問題なくシステムを運用、改修していくためにはシステムを熟知した運用要員及び開発要員を永続的に確保する必要があり、長期的には運用コスト、改修コストが高くなることになる。

4.2 機密性

衛星の取得したデータに関するポリシーは衛星プロジェクトごとに異なるが、一般的には衛星プロジェクト内でのみデータを利用できる占有期間を1年程度設けることが多い。衛星プロジェクトによってはさらにパケットという生データに触れられるメンバーを限定することで、誤ったキャリブレーションによるデータが作成されないようにするところもある。そのため、データに適切なアクセス権を設定することが求められる。パケット形式のデータから意味のあるデータを取り出すためには、データ部のフォーマットからキャリブレーションの仕方まで理解していなければならない。その点で SIRIUS は利用できる人間が限定されたシステムであり、データのセキュリティについてはそれで十分とされてきた面がある。もちろん、現在のシステムでもテレメトリデータを取得できる端末は制限されているが、端末ごとに取得できるデータを制限する機能までは有していない。1機の衛星に複数の組織が開発した機器が載ることも増え、衛星単位ではなく機器単位でアクセス権を設定したいというニーズもある。データベース機能を独自に作り上げた現在のシステムではこのニーズに対応することは難しい。

4.3 トレーサビリティ

テレメトリデータに不具合があった場合に SIRIUS が調査目的に利用されることを先に述べた。このニーズを満たすためには各パケットがいつどこで受信されたデータであるか、データの源泉にまでさかのぼることができなければならない。しかし、現在の SIRIUS は実はこの機能、トレーサビリティを有していない。マージデータに含まれる各パケットの源泉情報が記録されていないのである。これは現在の SIRIUS がテレメトリデータをフレーム単位で管理する仕組みになっており、受信時の時刻や地上局の情報をフレーム単位にしか格納できないことに起因する問題である。フレーム単位で管理するために、本来フレームの存在しないマージデータについてもソート済みパケットをフレーム形式に再構成しており、結果として同じフレームに格納された全てのパケットについてその源泉情報を保持できていないのである。

5 次期システム構想

前述の課題を解決するためには、テレメトリデータの管理方法そのものから見直す必要がある。SIRIUS をアーカイブとして運用し続けるためには、システムの透明性を担保して、システム固有の知識を有した特定の人物に依存しないシステムに移行することが求められる。このことから我々のグループでは次期科学衛星テレメトリデータベースの開発検討を開始した。

ここで改めて、テレメトリデータベースに最低限求められるユーザ要求を以下にまとめておく。

要求 1 通信路（パス、地上局、受信時刻等）を意識せずにデータ取得ができること

要求 2 各データの源泉情報を使いデータの由来がわかること

不具合が起きない限りユーザはデータそのものにしか興味はない。しかし、不具合発生時にはデータの由来を追跡できなければならないのである。次期システムではこれらを満足し、低コストかつユーザビリティの高いシステムを目指す。

5.1 基本構成の変更

システムの構成としては、保守性を上げるため、根幹にあたるデータベースの管理に汎用 RDBMS を導入する。排他制御等、データベースの基本となる機能を普及した汎用ツールで実現することで保守性・信頼性・開発効率等を向上させることができるとともに、運用要員に求める知識がシステム固有のものではなく RDB という一般的なものになることで、運用コストを抑えることにもつながると考えられる。これには、データのアクセス管理やバックアップ・リストア機能、冗長化・負荷分散機能についてもツールに含まれる機能を利用できるという利点がある。

単に RDBMS を導入するとはいっても、SIRIUS は毎月数千万パケットが追加されるデータベースである。設計にあたっては検索速度を維持しつつテーブルの分割などを使い、さらなるデータ増加を視野に入れたスケーラビリティを確保しておくことが重要と考えられる。

5.2 新たな機能の追加

システムの機能としては、以下の機能を追加、あるいは強化する。

源泉情報検索

パケットのトレーサビリティを確保するため、源泉情報を検索する機能を追加する。同一パケットが複数回取得されることもあるため、源泉情報は複数記録できるようにする。

登録状況閲覧

現在のシステムでは、Web を使ってデータが登録されたパスを調べることができる。ただし、登録しなかったパスについては掲載されない、登録時の警告・エラー情報が見られないなど不十分な点もある。そこで次期システムでは、登録されたパスだけでなく、未登録パスや登録できないパスについても表示し、警告やエラー情報を閲覧できるようにする。

新規データ提供インタフェース

現在の SIRIUS からテレメトリデータを取得するインタフェースは SDTP だけである。しかし、SDTP は特殊なインタフェースであるためにデータを取るためにある程度の習熟が必要である。また、SDTP のヘッダに含まれている情報は通信路の情報そのものであり、不要な情報と考えるユーザも多い。そこで、パケット形式のデータを HTTP や FTP といった一般的なプロトコルを用い、必要なデータに絞って提供する新たなインタフェースを用意する。

アクセス制御

セキュリティ要求を満たすため、データの提供においては衛星・APID ごとのアクセス権を定め、権限のあるユーザだけがデータを取得できる仕組みを用意する。

6 おわりに

ISAS における科学衛星テレメトリデータベース SIRIUS は、ほぼ全ての科学衛星にとってデータ処理の始点にあたるシステムとなっている。このシステムには保守性・機密性・トレーサビリティといった点で課題があり、その基礎から見直す必要性が出てきている。そこで我々のグループでは将来システムの検討を開始し、本稿ではその構想について概略を説明した。

今後はプロトタイプを通じて衛星プロジェクトユーザの意見を取り入れながら設計をまとめ、開発を進めていく予定である。

参考文献

- [1] CCSDS, Space Packet Protocol, Issue 1, September 2003
- [2] CCSDS, AOS Space Data Link Protocol, Issue 2, July 2006
- [3] ISAS/JAXA, 地上系インタフェース仕様書, <http://www.c-soda.isas.jaxa.jp/ssog/document/document1.html>