

## ASTRO-H 衛星搭載の中央制御コンピュータにおける時刻配信性能の検証

中谷 創平 (埼玉大学大学院 理工学研究科 田代・寺田研究室)

### Abstract

ASTRO-H 衛星とは日本が開発を行っている X 線天文衛星である。ASTRO-H 衛星は、パルサーなどの時間変動の速い天体の観測を行うために、最終目標を  $30 \mu s$  とした高い時刻精度が要求されている。ASTRO-H 衛星では、GPS から受信したクロックを基に衛星内で基準となる時刻を作成、TimeCode と呼ばれる時刻情報としてネットワーク内に配信し、同期を行っている。しかし、同期を行うまでに時刻情報には遅延とジッターが生じてしまい、その結果、時刻精度が悪化してしまう。我々は、時刻精度を悪化させる要因を 7 つの項目に分け、合計で時刻精度目標である  $\sim 30 \mu s$  を達成しようと考えている。今回はその中の一項目である”中央制御コンピュータから配信される TimeCode のジッター”に関して、ASTRO-H 衛星搭載品を用いて検証試験を行い、衛星搭載品に関する重要なデータを取得するとともに、測定結果が目標値を満足する値であるという結果を得た。今回はこの検証試験について報告する。

## 1 イントロダクション

ASTRO-H は、2015 年打ち上げ予定の日本が開発を行っている第 6 番目の X 線天文衛星である。ASTRO-H の目指す科学目標のひとつに、中性子星パルサーの電磁波放射機構の解明というものがある。図 1 は、日本が打ち上げた第 5 番目の X 線天文衛星「すざく」に搭載されている HXD が検出した、かに星雲中心の中性子星パルサーの X 線帯域におけるライトカーブである。右の図は X 線強度のピークを抜き出したものであり、青い線は電波観測から得られた同じパルスにおける電波のピーク値である。この X 線と電波のピークには  $300 \mu s$  程度のずれが観測されている。そこで、ASTRO-H ではこのパルスのピークのずれを高い精度で測定し、パルサーでの電磁波発生機構の解明を目指している。

ここで重要となってくるのが、ASTRO-H における観測機器での時刻と絶対時刻とのずれを表す”時刻精度”である。ASTRO-H では X 線と電波のずれを 1 桁高い精度観測することを目標とし、時刻精度の目標値を  $\sim 30 \mu s$  としている。

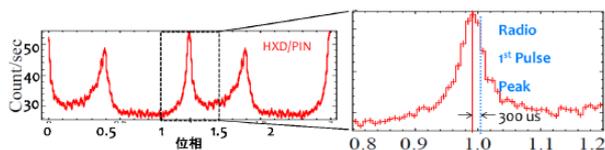


図 1: かにパルサーからのライトカーブ (左)、かにパルサーからの X 線と電波 (水色線) のピークの到来時刻差

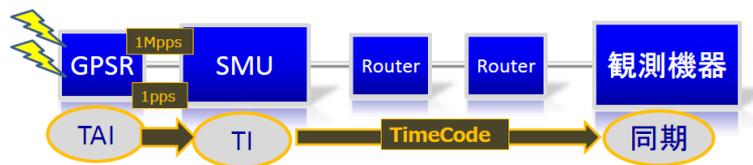


図 2: ASTRO-H ネットワーク簡略図

## 2 ASTRO-H 時刻付け方法

図 2 は ASTRO-H ネットワークの簡略図である。ASTRO-H は搭載されている GPS 受信機 (GPSR) から原子時計時刻 (TAI) に関する情報を、GPS クロックとして受信している。GPS クロックは、正秒のタイミングを与える 1 pps と、 $1 / 106$  秒周期の

クロックである 10Mpps の 2 種類の信号からなっており、それを中央制御コンピュータ (SMU) に送信する。SMU はそれを基に「衛星時刻 (TI)」と呼ばれる衛星内の標準となる時刻を生成する。そして TI は、TimeCode と呼ばれる 8 bit の信号で下位ノードに向けて配信され、観測機器に到着し、時刻の同期を行う。

ASTRO-H では、以前までの衛星で使用されていたような時刻配信線を使用せず、この TimeCode を配信することで時刻情報の同期を行っている。しかし、この時刻配信方法では TimeCode を配信する際、TimeCode を他のコードが流れている中に割り込んで送信する必要があるため、配信タイミングによって待ちの時間が生じてしまう。つまり、TimeCode がノードを通過するごとに時刻情報に遅延とジッター (信号到着時間の時間的な揺らぎ) が発生してしまうことを意味する。遅延については、時刻情報を配信する経路において遅延を測定し、較正を行えばよいが、ジッターは発生要因が TimeCode の配信方法によるランダムな値であるためキャリブレーションを行うことができず、時刻精度を悪化させる要因となる。

ASTRO-H における時刻精度目標とは、このジッターの値が GPSR が受信する TAI の時刻を基に、SMU が TimeCode を配信、観測機器が同期を行うまでに発生するジッターが  $\sim 30\mu\text{s}$  であることを意味する。

TimeCode 配信時のジッター以外にも、時刻精度を悪化させる要因にはいくつかあるため、それを項目に分けたエラーバジェットというものが提案されている (表 1)。ここで、ジッターとして定義されているのは、ヒストグラムをガウシアンでフィッティングしたときの  $3\sigma$  の値である。エラーバジェットの項目のうち、(A) などはスペックの問題となってくるが、項目 (B), (C) は ASTRO-H ネットワークに関して試験を行う必要があるものである。今回の発表の元となる筑波宇宙センターにおける試験では、エラーバジェットの項目のうち、項目 (B), (C) の測定を行い、その結果が要求されている時刻精度を満たすものであるかを ASTRO-H のフライトモデルを用いて検証した。今回の測定試験の目的は、この筑波宇宙センターでの測定試験のうち項目 (B) 「GPS からの 1 pps 信号と SMU から配信される TimeCode

間のジッター」について、その測定方法と測定結果を報告するものである。

表 1: エラーバジェット

	検証項目	値
(A)	TAI と GPSR からの 1pps のジッター	$< 0.02\mu\text{s}$
(B)	1pps と SMU から TimeCode 間ジッター	$< 0.5\mu\text{s}$
(C)	各検出器の時間分解能	$< 5\mu\text{s}(\text{SXS})$
(D)	TimeCode 配信精度	$< 1.68\mu\text{s}$
(E)	検出器での TimeCode 受信処理	$< 1\mu\text{s}$
(F)	各検出器での LocalTime 分解能	$5\mu\text{s}$
(G)	軌道精度	$< 3\mu\text{s}$

### 3 ASTRO-H 時刻付け方法

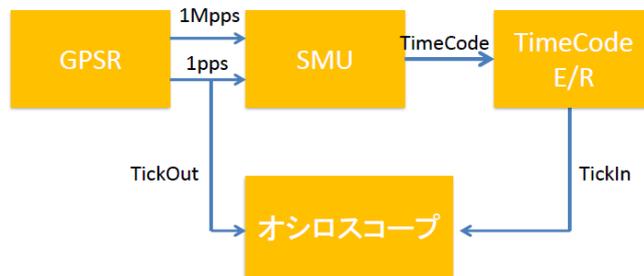


図 3: SMU 時刻精度検証試験セットアップ簡略図

測定試験でのセットアップの簡略図は図 3 である。試験の目的は、エラーバジェット項目 (B) 「GPS からの 1 pps 信号と SMU から配信される TimeCode 間のジッター」が  $\sim 30\mu\text{s}$  以下であることを検証するとともに、GPSR が配信する 1pps 信号と、それを基に SMU が TimeCode を生成、配信するまでの時刻の遅延を測定することである。

測定方法は TimeCode を受信したときにトリガ (TickOut 信号) を出す装置 TimeCode E/R を使用し、GPSR から配信される 1 pps 信号を TickOut 信号としてとりだし、それと TickIn 信号との時間差をオシロスコープで測定する。しかし、このセットアッ

プで測定される時間差には、測定したい SMU の遅延とは別に TimeCode E/R の遅延も含まれてしまっている。そのため、事前試験として埼玉大学実験室において TimeCode E/R の遅延を測定した。

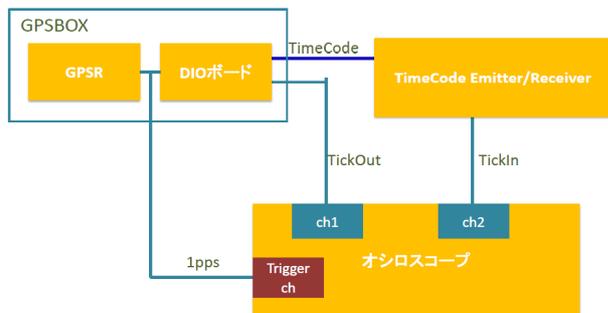


図 4: 事前試験セットアップ簡略図

事前試験のセットアップを図 4 に示す。

GPSBOX とは、GPS 衛星から得られる GPS クロックに同期した TimeCode を生成し配信する装置である。GPSBOX で TimeCode が送信されるのと同時に配信される TickOut 信号と、TimeCode E/R が TimeCode を受信したのと同時に送信する TickIn 信号をオシロスコープに入力する。

今回の測定では 25169 回分の波形データを取得した。TickOut 信号と TickIn 信号の時間差の測定結果をヒストグラムにする (図 5)。遅延の平均値は 387 ns であり、標準偏差は 6.4 ns となった。測定した遅延は、本試験で測定した遅延を較正するための値となる。

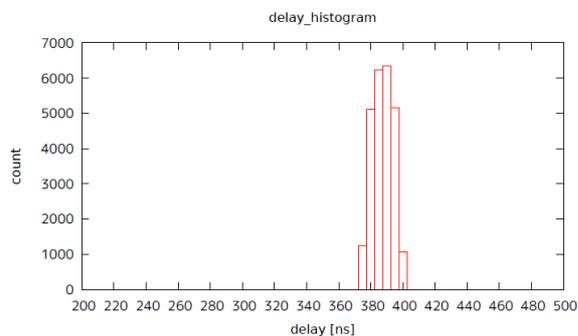


図 5: 事前試験結果ヒストグラム

## 4 本試験

本試験は JAXA 筑波宇宙センターにて ASTRO-H のフライトモデルを用いて測定を行った。試験は、ASTRO-H に搭載されている 軟  $\gamma$  線検出器 (SGD) の立ち上げ前 (試験 1) と、SGD 立ち上げ後 (試験 2) の 2 回行った。SGD 立ち上げ後は SGD に疑似的なイベントを入れることで観測を行っている状況を作り出すため、この前後で測定をおこなうことで SMU が busy な状態であることが測定項目にどう影響を及ぼすかを確認する。取得した波形数は 試験 1,2 でそれぞれ 1910 個分, 1619 個分である。

測定で得られたデータから遅延時間を測定し、ヒストグラムを作成した (図 6, 図 7)。

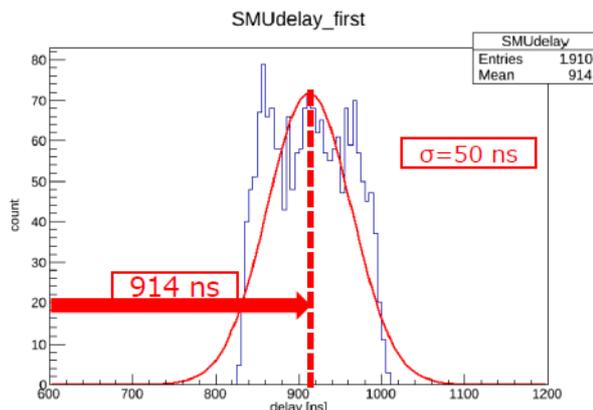


図 6: 試験 1 ヒストグラム

発生する遅延に関しては、ヒストグラムをガウシアンでフィッティングしたときの中央値の値で定義されている。したがって、今回測定した遅延は TimeCode E/R の遅延を引き算し、試験 1 で 527 ns 試験 2 で 532 ns となる。またジッターに関しては、ガウシアンでフィッティングしたときの標準偏差  $\sigma$  の 3 倍の値である  $3\sigma$  で定義されている。

今回の測定結果がエラーバジレットの要求を満たすものであるか、 $3\sigma$  について見てみる。測定結果は試験 1 で 150 ns、試験 2 で 135 ns であり、エラーバジレットの値を満たすことが確かめられた。また、試験 1,2 において測定結果に差が見られないことから、SGD が観測を行っている状況が SMU の時刻情

成を目指す。

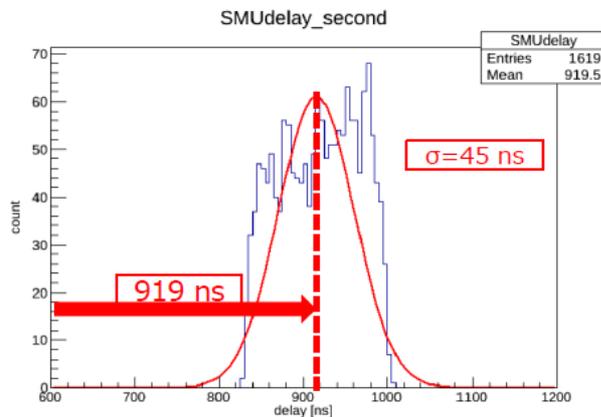


図 7: 試験 2 ヒストグラム

報の配信に及ぼす影響はないと考えられる。

ジッタの発生する原因として、SMU 内部ルーターにおける TimeCode 配信時の揺らぎが考えられる。SMU の内部ルーターは TimeCode を生成し、リンクレート 50 MHz で配信している。リンクレート 50 MHz の場合、信号線中をデータが流れていないことを表す NULLCode (8 bit) が流れているとし、そこに TimeCode を割り込んで配信させるとすると、TimeCode 由来のジッターは理論的には 160 ns となる。また、TimeCode E/R の精度が  $\sigma = 6.4$  ns であることを考慮すると、ジッタの主な原因は TimeCode のジッターであると言える。

## 5 まとめ

取得したデータの解析から、遅延時間のヒストグラムを作成しガウシアンでフィッティングした結果、標準偏差は、SGD 立ち上げ前 (試験 1) で  $\sigma = 50$  ns、SGD 立ち上げ後 (試験 2) で  $\sigma = 45$  ns であった。したがって、ジッターは試験 1 で  $3\sigma = 150$  ns、試験 2 で  $3\sigma = 135$  ns であり、エラーバジェットの要求値  $0.5\mu\text{s}$  を満たす結果となった。SMU の遅延時間について、事前試験で測定した TimeCode E/R の遅延を引いた値は、試験 1: 527 ns、試験 2: 532 ns であった。この遅延の値は較正用のデータとなる。今後は、エラーバジェットにおける他項目の測定を行ってゆき、ASTRO-H における時刻精度目標の達