

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H における時刻配信精度の検証

井上 拓 (埼玉大学大学院 理工学研究科 田代・寺田研究室)

Abstract

ASTRO-H は現在開発中の X 線天文衛星である。ASTRO-H の観測対象には、パルサーなどの数 ms の周期で激しく時間変動するものも存在する。このような天体を観測するためには、X 線イベントに対して μs オーダーの精度で時刻付けをする必要がある。

X 線イベントに時刻付けをするためには、基準となる時刻を検出器まで配信しなくてはならない。我々はミッション要求である $30\ \mu\text{s}$ 以内の時刻付け精度を達成するために、この配信経路での誤差を検証している。現在、先行研究により衛星内の SMU から各観測装置への時刻配信精度を検証する方法が確立されており、衛星搭載同等品を用いた試験では $2\ \mu\text{s}$ 以下の誤差に収まっていることが確認された。ここではこの検証方法について報告する。

1 イントロダクション

ASTRO-H はすばやくに継ぐ日本で 6 番目の X 線天文衛星である。ASTRO-H の観測対象の一つに X 線パルサーがある。X 線パルサーとは周期的に X 線のパルスを発生する天体であり、数 msec の早い時間変動をするものも存在する (図 1)。パルサーなどによる高速な X 線強度の時間変化をとらえるためには、それぞれの X 線イベントに対して協定世界時 (UTC) での正確な時刻情報を持たせる必要がある。これを時刻付けという。ASTRO-H では X 線による観測と電波などの他の帯域による同時観測を実現するために、UTC に対して $30\ \mu\text{s}$ 以内の時刻付け精度を要求している。

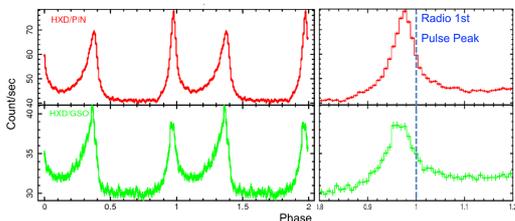


図 1: すばやくで観測したかにパルサーの光度曲線

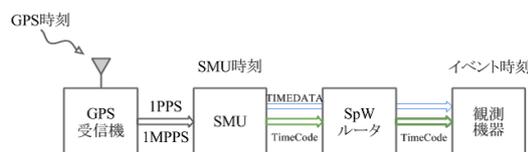


図 2: ASTRO-H での時刻付け方法

2 ASTRO-H での時刻付け方法

ASTRO-H は内部ネットワーク全体を管理する SMU (Satellite Management Unit) を頂点としたツリー上のネットワークとなっており、衛星内部の時刻は SMU の時刻を基準にすべての下位ノードに配信される (図 2)。したがって検出器で検出された各イベントに対して時刻付けをするためには、まず ASTRO-H の SMU 時刻を UTC と同期させる必要がある。これには GPS 時刻を用いている。

ASTRO-H には GPS 受信機が搭載されており、GPS の電波から、正秒の時刻を与える 1PPS と、 10^{-6}s 周期の 1MPPS の信号を得ている。UTC と GPS 時刻には 1 対 1 の関係があるため、1 秒毎に 1PPS を用いて GPS 時刻と SMU 時刻を同期させることで、GPS 時刻と SMU 時刻を同期させている。

SMU から下位ノードに配信される衛星時刻は図 3 のようなフォーマットをしており、1 秒以上と以下で配信方法が異なっている。1 秒以下の衛星時刻

は、1MPPS の信号を用いて 1 秒を $2^6 = 64$ 個に分割して生成されており、SpaceWire の TimeCode として配信される。つまり、1PPS と同期したときの TimeCode を TimeCode=0 とし、TimeCode=63 まで 15.625 ms ごとに配信される。また、1 秒以上の衛星時刻は GPS の時刻を用いて生成され、1 秒ごとに TIME DATA として下位ノードに直接書き込まれる。



図 3: 衛星時刻のフォーマット

TimeCode の 15.625 ms という時間分解能は衛星のシステムとしては十分だが、パルサーなどの ms 単位で明るさの変動する天体を捉えるには長すぎる。そこで観測装置により高い時間分解能を与える方法が検討された [神頭修論]。以下にその方法を示す。

まず各観測装置に水晶発振器をおき、TimeCode とは独立なクロックを生成する。これを LocalTime という。LocalTime は衛星時刻よりも高い時間分解能を持っており、衛星時刻とは完全に非同期に生成される。そして、観測装置側で LocalTime と衛星時刻の対応表を生成し、関数で内挿することで、各光子イベントのタイミングでの詳細な衛星時刻を決定する (図 4)。この方法により、単純なロジックで光子イベントに対しより高い時間分解能を与えることができる。

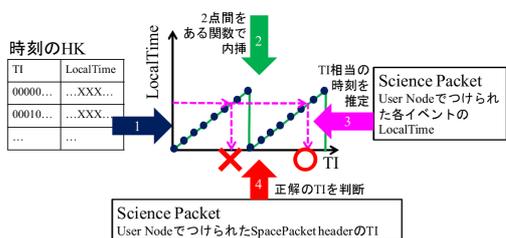


図 4: LocalTime を用いた、より時間分解能の高い時刻付け

3 時刻付けの精度

前節で、ASTRO-H の光子イベントに対する時刻付け方法を説明した。この時刻付け方法において、UTC に対する誤差の原因となりうるものには次のようなものがある。(A) SMU へ配信されるクロックのジッタ、(B) SMU から配信される TimeCode の精度、(C) 各検出器の LOCALTIME の時間分解能、(D) TimeCode の配信精度、(E) 固定遅延の補正精度、(F) 各検出器での TimeCode の受信処理、(G) 軌道決定精度。

(A) については衛星に搭載される GPS 受信機の仕様により値が決まっている。

(B) は GPS 受信機から発信された 1PPM の信号を SMU が受け取ってから、TimeCode を生成するまでの時間差である。

(D) は SpaceWire の TimeCode 配信方法によるものである。ASTRO-H は時刻配信に専用線を用いず、SpaceWire という通信規格をもちいて、時刻配信とデータ転送を単一のケーブル上で行なっている。SpaceWire はすべてのデータを 10bit の Character という単位で転送しているが、TimeCode は例外で、データの Character の隙間に割り込んで転送することができる。したがって、TimeCode を送るときには最大で Character 長の 10bit ぶんの「待ち時間」が発生することになる (図 5)。これはジッタと呼ばれ、TimeCode の配信精度を悪くする要因となっている。ジッタは SpaceWire のリンクレートに依存し、0s から各リンクレートでの 10bit ぶんの時間までランダムに発生する。

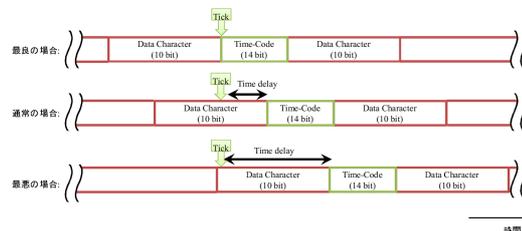


図 5: ジッタの発生する様子

(E)、固定遅延は半導体の応答時間や、信号がケーブルを伝わる速度などによるハードウェア的な遅延である。一般に固定遅延は各コンポーネントに特有

の値を持ち、キャリブレーションを行うことでほぼ補正をすることができる。ここでの精度は、補正をしきれなかった分の誤差である。

(F) は各観測装置に TimeCode が届いてから、実際に時刻同期を行うまでの誤差である。

(G)、地上の望遠鏡と ASTRO-H との同時観測を実現するために、地上と衛星とのイベントの到来時刻の違いを補正しなくてはならない。したがって、衛星の軌道決定誤差を光速で割った量だけ時刻決定誤差が生じることになる。

ASTRO-H の時刻決定誤差は、これらの誤差の和として定義されている。したがって、サイエンスからの要求である $30 \mu\text{s}$ 以内の時刻付け精度を確認するために、それぞれの誤差についての実験方法を検討し、測定しなくてはならない。

4 測定器への時刻配信精度の測定

ジッタによる誤差と固定遅延は各ノードで起こる。したがって衛星の SMU と観測機器のように、間にノードを何段も挟む場合、それぞれのノードでのジッタと固定遅延が組み合わさることになる。ジッタは各ノードで完全にランダムであり、固定遅延は各ノードに固有の値であるので、離れたノード間でのジッタと固有遅延は予測が可能である。そこで、各ノードにおけるジッタと固定遅延からネットワーク上での任意のノード間のジッタと固定遅延を見積もる方法が考案された [岩瀬修論]。これにより、(D):TimeCode の配信精度、(E):固定遅延の補正精度を測定できる。この方法を検証する実験は以下のように行った。

まず衛星ネットワーク上の各装置単体でのジッタと固定遅延を測定した。その結果、ジッタは予測された通りリンクレートに依存し、決まった幅を持つことがわかった。また固定遅延はリンクレートと各装置に固有の値を持つことがわかった。

次に衛星搭載同等品をもちいて、実際の SMU から観測装置までの衛星ネットワークを模擬し、時刻配信誤差を測定した。また、計算機を用いて各ノードでのジッタを単純に足し合わせたモデルでシミュレーションを行った。

シミュレーションによる予測値が図 6、実際のネットワークを模擬した系で測定した結果が図 7 である。

固定遅延は $6.643 \mu\text{s}$ であり、各装置の固定遅延を単純に足したときの値である $6.830 \mu\text{s}$ との差は約 $0.2 \mu\text{s}$ となった。これは許容誤差 $30 \mu\text{s}$ と比べると十分小さい値であり、この方法による固定遅延のキャリブレーションが妥当であることがわかった。また、ジッタは測定値とシミュレーションによる値がよく一致しているため、ジッタによる時刻配信誤差は予測可能であることがわかった。

したがって、実際の衛星の時刻転送誤差を測定する際は、この実験と同様に各衛星搭載品ごとのジッタと固定遅延をリンクレート毎に測定し、そこから予想される値と実際のネットワーク上でのジッタと固定遅延を比較する。この結果と同様であることが確認できれば、すべてのノード間で測定しなくても任意のノード間での誤差が予測可能である。

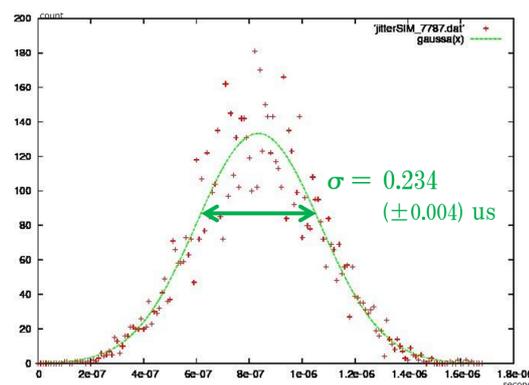


図 6: ジッタのシミュレーションによる予測値

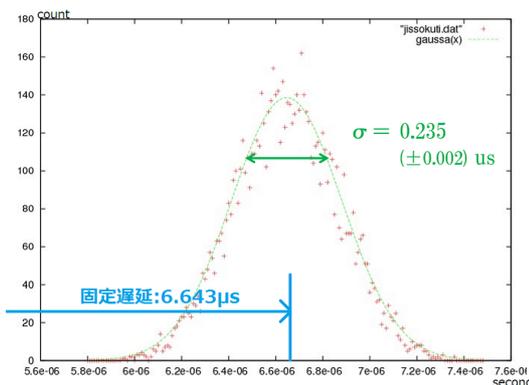


図 7: 衛星を模したネットワークでのジッタの計測値

5 まとめ

ASTRO-H の時刻付け誤差として考えられる要因のうち、時刻配信にかかわる誤差の検証方法が決定した。このうち (D) の TimeCode 配信精度については、各ノードでのジッタを単純に足し合わせたモデルで予測可能であることがわかった。(E) の固定遅延については、各ノードでの固定遅延を足すことで推定でき、補正精度はこの実験では $1\ \mu\text{s}$ 以内に収まった。今後は衛星搭載品を用いて同様の試験を行い、この実験と同じ結果が出ることを確認していく。

Reference

神頭知美. 「ASTRO-H 衛星における時刻付けシステムの開発」. 修士論文. 埼玉大学. 2010

岩瀬かほり. 「ASTRO-H 衛星における SpaceWire を利用した時刻決定方法の検証と確立」. 修士論文. 埼玉大学. 2012

ECSS-E-ST-50-12C. SpaceWire - Links, nodes, routers and networks. 2008