

TDIモードの応用による人工衛星/スペースデブリの 光度短周期時間変動観測 II

奥村真一郎¹⁾・浦川聖太郎¹⁾・西山広太¹⁾・坂本 強¹⁾・浅見敦夫¹⁾・橋本就安¹⁾・
高橋典嗣¹⁾・吉川 真^{1), 2)}

¹⁾ 日本スペースガード協会 ²⁾ JAXA

Short-period light-curve observations of artificial satellites/space debris using the Time Delay Integration method II

Shin-ichiro OKUMURA ¹⁾, Seitaro URAKAWA ¹⁾, Kota NISHIYAMA ¹⁾, Tsuyoshi SAKAMOTO ¹⁾,
Atsuo ASAMI ¹⁾, Nariyasu HASHIMOTO ¹⁾, Noritsugu TAKAHASHI ¹⁾, and Makoto YOSHIKAWA ^{1), 2)}

Abstract

In this paper, we present a method of the Time Delay Integration (TDI) based light-curve monitoring observations for space objects. When a telescope tracks a space object, the TDI-mode exposure produces an artificial elongated trailed image on the CCD according to the electric charge transfer speed in TDI, because the electric charge is shifted on the CCD while the shutter is open. The short-period light curve of the object can be extracted from the streak image. In this method, it is easy to correct the time variation of atmospheric transmission during the exposure, because the neighboring reference stars on the same image are also appear as streaks. Limiting magnitude is estimated to be 12-15 magnitudes, which depends on the electric charge transfer speed and the exposure time. It is improved with a lower charge-transfer rate or with a shorter exposure.

Key Words: TDI (Drift Scan), Light Curve, Artificial Satellite, Space Debris

1 はじめに

宇宙物体の光度の時間変化（ライトカーブ）を調べることにより、回転運動の様子や形状を推定することが可能となる。ライトカーブを得る観測手法はいろいろ考えられるが、Time Delay Integration (TDI) 方式によるCCDの読み出しを応用することによってもライトカーブを得ることができる。TDI方式を用いたCCDの読み出しは本来、視野の中で移動する物体の動きに電荷転送速度を同期させることにより、移動物体を高S/Nで検出するための手法である。以下、TDI方式の概要とライトカーブ観測への応用、その利点、限界等級の評価、秒単位で変光する人工天体の変光観測結果について紹介する。

2 TDIの概要

TDI (Time Delay Integration、別名Drift Scanとも言う) とは、CCDを用いた観測での読み出し手法の1つであり、露出をしながら同時に読み出し（電荷転送）を行う手法のことを言う。元々は、移動物体に対してその移動速度に電荷転送速度を同期させることにより、移

動物体を点状に撮影するための手法である。天文観測への応用としては、望遠鏡を固定し、露出したままで地球の自転による星の日周運動に速度を合わせて追いかけるように東から西方向に読み出すことにより、効率良く広い領域のサーベイ観測データを取得することができる。典型的な例としては、SDSS（スローン・デジタル・スカイサーベイ¹⁾）がこの方法でデータを取得している。

3 TDIの静止軌道宇宙物体観測への応用

TDIによる読み出しを宇宙物体、特に静止軌道物体のサーベイ観測に応用することもできる²⁾。この場合には天文観測の場合と逆向き（西から東）に電荷転送させ、望遠鏡を恒星時追尾駆動させることにより、静止軌道にある物体を点状に撮像させて観測するという手法になる。ここでは詳しい説明を省略するが、望遠鏡固定で撮影する場合に比べて長時間露出時でも位置測定が精度良くできること、効率良いサーベイ観測が可能になるなどの利点がある。

4 光度変化観測への応用

日周運動をする天体観測の場合でも静止軌道物体観測への応用の場合でも、ターゲットとする移動物体を点状に撮像させることがTDI観測の基本である。ここでは少し視点を変えて、視野内で静止している物体をTDIで観測することを考える。TDIでは露出をしながら電荷転送をするので、静止している対象に対してTDIで観測するとその像はCCD上で電荷転送方向に延びた形となって記録される。その性質を利用して光度の時間変化（ライトカーブ）をとらえる方法を示す。

仮に、視野内で静止している物体があるとする。この物体に対してTDI方式で観測すると、露出時間と転送速度に比例した長さで電荷転送方向（厳密には、電荷転送方向に対して逆向き）に延びた像が得られる。この像のプロファイルが露出時間中の光度変化を表すものとなる。

以下に、実際に撮った画像の例を示す。撮影に使用したのは美星スペースガードセンターの1 m望遠鏡とモザイクCCDカメラ「Volante」である。その基本ス

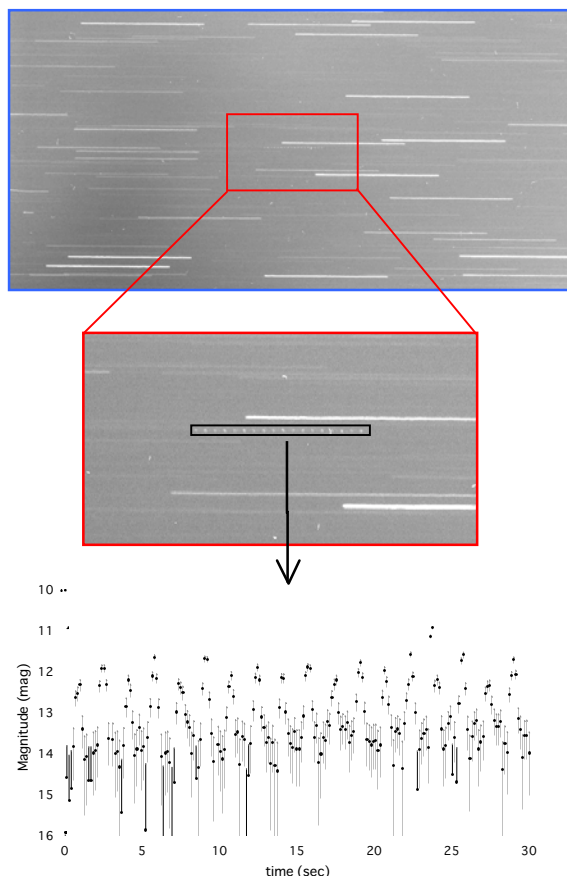


図1 TDI方式で撮像したBSAT-2A衛星の画像(上、中、2×2ビニングで取得)、そこから抽出したライトカーブ(下)。等級は測光標準星の明るさを基準に求めた、Rバンド相当での値。露出時間は30秒、TDIでの電荷転送速度は7.07pix/秒で、時間サンプリング間隔は0.1415秒。

表1 美星スペースガードセンター1 m望遠鏡とCCDカメラVolanteの基本スペック

望遠鏡架台、焦点	赤道儀式、カセグレン
焦点距離	3 m (F/3)
検出器	浜ホト製裏面照射完全空乏型 CCD(2k×4k)×4枚
視野 (赤経×赤緯)	72°×139°
Pixel Scale	1.06"/pix (ビニングなし) 2.12"/pix (2×2ビニング)

ックを表1に示す。

望遠鏡は静止軌道物体BSAT-2Aの動きを追尾させた状態で、TDIの手法で取得したBSAT-2Aの画像とそこから得られたライトカーブを図1に示す。画像はいわゆる一次処理（バイアス、ダークの引き算とフラット処理、フラットはTDI専用のものを使用）を施したものである。画像は左が東で、この画像では右から左が電荷転送の方向である。ライトカーブのグラフは画像の横軸を時間軸に変換し、シーイングの影響を考慮して画像の縦軸（南北）方向に5素子分足し合わせた出力をもとに、等級の値に変換したものである。観測を実施した時の電荷転送速度に相当する時間サンプリング間隔は0.1415秒であるが、シーイングの影響で画像上の横方向（時間方向）にもなまってしまうため、平均のシーイングサイズを4秒角とすると実際の時間分解能は2×2ビニング時で1.9ピクセル分に相当する、約0.27秒ということになる。

5 他の手法との比較

静止軌道物体のライトカーブを測定する手法としては、例えば望遠鏡を恒星時追尾駆動させることによって可能である^{3), 4)}。恒星時追尾での撮影の場合には、背景の恒星は点状に、かつ常に同じ位置に写るため、恒星を消しやすいという利点がある。ただし、時間サンプリング間隔は一定(sidereal rate)である。これに対してTDIを用いることの利点は、背景の恒星も延びた像となるため露出時間中の大気透過率変動の補正ができること、サンプリングの時間間隔を調節できること、望遠鏡の追尾さえできれば静止軌道物体以外の低軌道衛星等にも応用が可能であること、等である。以下に恒星の像を用いて大気の変動を補正する方法を示す。図2は図1の画像に同時に写った恒星を5つピックアップし、その出力値の変化を求めたものである。図3は各恒星の出力値の平均値を規格化し、そこからのばらつきを求めて等級に変換したものである。これが、この観測での測光誤差に近いと考えられる。大気透過率の変動については図1のグラフから図3を引き算することにより補正できる。

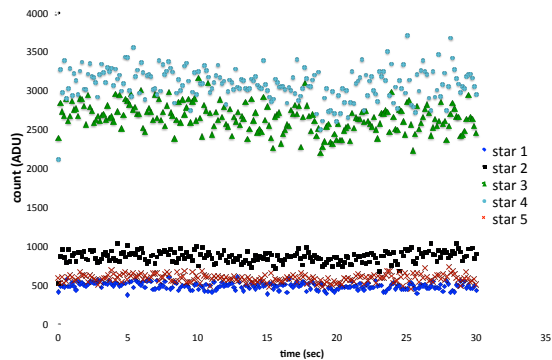
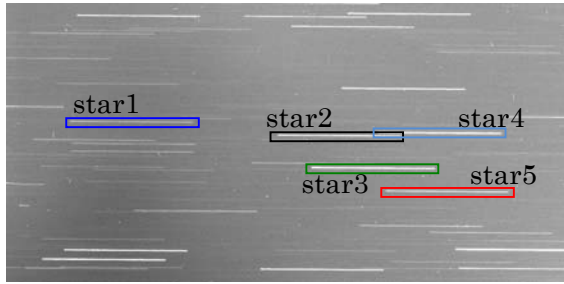


図2 露出時間中における、背景に写った恒星（上図）の光度変化（下図）。

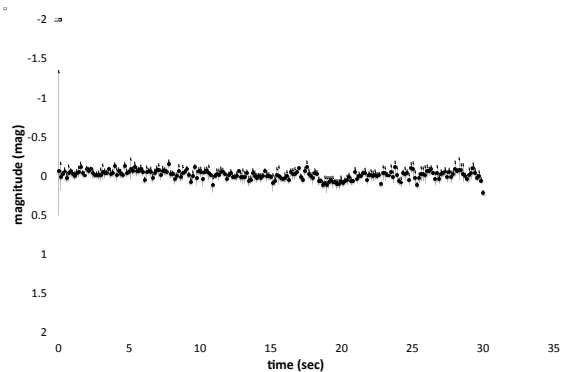


図3 恒星のライトカーブ変動から導き出した、大気透過率の変動と測光エラー。

6 限界等級評価

取得した画像を用いて限界等級の評価を行った。通常の観測と大きく異なるのは、各素子に蓄積される信号の強弱を決めるのは露出時間ではなく電荷転送速度であること、露出を長くすればするほど背景の空が明るくなり、信号対雑音比（S/N比）が逆に悪くなることである。電荷転送速度と露出時間を3通りずつ変えた場合について、およその限界等級を表2にまとめた。限界等級は30秒露出、転送速度0.1415秒/pixで約12.8等であるが、同じ転送速度で露出時間を5秒にすると1等深くなる。また転送速度を1秒/pixに遅くするとさらに2等深くなる。

表2 TDIを用いた宇宙物体の短周期

露出時間	サンプリング間隔 (電荷転送タイミング)		
	1 秒	0.1415 秒	0.028 秒
30 秒	14.9 等	12.8 等	11.0 等
5 秒	15.9 等	13.8 等	12.0 等
1 秒	16.7 等	14.6 等	12.8 等

光度変化観測における限界等級（S/N比=10）

7 まとめ

TDI方式を応用して、宇宙物体の光度変化、特に周期の短い光度変化の観測を試みた。恒星時追尾で望遠鏡を駆動させてデータを取得する方法と比べて、恒星の明るさの時間変動を示すデータが同時に取れるため、同じ観測データを利用して大気透過率の補正や測光エラーの評価を行うことができる。限界等級は30秒露出、転送速度0.1415秒/pixで約12.8等であるが、露出時間を5秒にすると1等深く、また転送速度を1秒/pixに遅くすると2等深くなる。TDI方式を利用した光度変化観測は、望遠鏡の追尾さえ可能であれば静止軌道物体だけではなく低軌道物体などにも応用が可能である。

参考文献

- 1) York, D. G. et al.: The Astronomical Journal, 120, 1579, 2000.
- 2) 奥村真一郎 他, TDIモードによる静止デブリ観測の試み, スペースガード研究, 3, 53, 2011
- 3) 黒崎裕久, 柳沢俊史, 中島厚: 静止軌道上デブリ等の光度変化の観測, 第52回宇宙科学技術連合講演会 2H13, 2008.
- 4) 黒崎裕久, 柳沢俊史, 中島厚: 静止軌道宇宙物体の光度変化の観測と解析, 第53回宇宙科学技術連合講演会 3H11, 2009

(2012年12月23日受付, 2013年1月15日受理)