

Time Delay Integration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

奥村真一郎¹⁾・西山広太¹⁾・浦川聖太郎¹⁾・坂本 強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/ISAS

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

Shin-ichiro OKUMURA¹⁾, Kota NISHIYAMA¹⁾, Seitaro URAKAWA¹⁾, Tsuyoshi SAKAMOTO¹⁾,
Noritsugu TAKAHASHI¹⁾, and Makoto YOSHIKAWA^{1),2)}

Abstract

In this paper, we present short-period light-curve observations by application of the Time Delay Integration (TDI) mode. A TDI-mode exposure while tracking a target object produces an artificial elongated trailed image. We can derive the short-period light curve of the object by examining the profile of the trailed image.

Short-period light-curve test observations were carried out for some artificial satellites/space debris using the TDI method. Two examples of the results are shown here. For one of them, its pulsation period was determined to be 2.1 second. Limiting magnitude for the TDI light-curve observation was also evaluated. It depends on the charge transfer speed of the CCD and total exposure time.

Key Words: TDI (Drift Scan), Short-period light curve, Artificial satellite, Space debris

1 はじめに

Time Delay Integration (TDI; 別名Drift scan)モードとは、移動物体を点状に撮像することを目的としたCCDの読み出し方法の一つである。物体の移動速度に電荷転送の方向、タイミングを同期させ、露出をしながら電荷転送することにより移動物体を点状に撮像し、信号対雑音比を向上させるものである。天体観測へのTDIモードの応用例としては例えばSloan Digital Sky Surveyのように、電荷転送速度を星の日周運動に合わせることで、望遠鏡を固定したままで広い範囲のサーベイ観測を効率よく行うという使用方法が一般的である。また少し特殊な用途として、望遠鏡を恒星時追尾で駆動させて逆向きに日周運動の速度で電荷転送することにより、視野内で東方に移動してゆく静止衛星を点状に撮像するという方法もある¹⁾。

いずれにしても基本的に、TDIモードを使用する目的は視野内の移動物体を点状に撮像することである。しかしここでは発想を変えて「静止している」天体に対してTDIモードで撮像することにより、あえて転送方向に延びた像を取得し、その天体の露出時間中の光度変化を調べることを考える。なおここで「静

止している」天体とは、視野の中で移動せずに止まっている天体を指す。

2 概要

「静止している」天体の例として恒星時追尾での一般の天体を考えてもよいが、美星スペースガードセンターの望遠鏡は人工衛星の追尾が可能である。そこで、まずは動きの小さい静止衛星を追尾し、これを「静止している」対象として短時間周期光度変動をとらえることを考える。「静止している」天体を撮像するのであるから通常のCCDの読み出し方法(シャッターを開いて露出開始、シャッターを閉じてから転送)ならば当然天体は点状に写る。ところがTDIモードでは露出中に電荷転送を行うので、TDIモードで撮像すると転送速度と露出時間に応じた長さで読み出しの方向(パラレル転送の方向)に延びた星像となる。たとえば、電荷転送のタイミングを0.1秒間隔にすれば、0.1秒毎に隣の列の素子に光が入射するので、0.1秒毎の光度変化が記録されることになる。そのプロファイルを調べることで光度の変動を見る。光度変化の時間分解能は電荷転送の速度によって決められる。

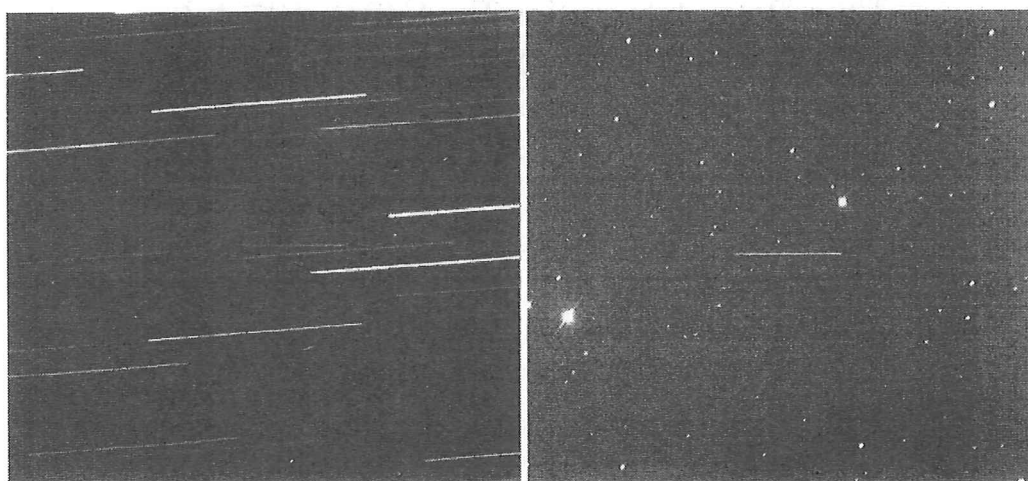


図1 左：静止衛星を追尾し、TDIモードで読み出した例。右：恒星時追尾で静止衛星を観測した例。いずれも、中央付近に水平に伸びた像として写っているのが静止衛星。

3 他の手法との比較

単純に伸びた像を得るだけならば、静止衛星の場合であれば恒星時追尾で撮像することによっても達成できる(図1)。しかし、この方法とTDIモードを用いた方法を比較した場合、TDIモードを利用した方が以下の点でメリットがある。

1. 電荷転送速度の調節により時間サンプリング間隔(時間分解能)を調節可能
2. 背景に写る恒星の像のプロファイルから、露出中の大気透過率変動を補正可能
3. 静止衛星はもちろん、望遠鏡が追尾さえすれば低軌道地球周回衛星にも適用可能
4. 一般の天体観測にも適用可能

恒星時追尾では目的天体の移動速度が一定(静止衛星で赤道上的の場合 15 秒角/秒)であるがTDIでは転送速度の調節により画面上での移動速度、すなわち時間分解能の調節が可能である。また、背景の恒星も伸びて写るのでそのプロファイルを調べることにより露出中の大気の変化(透過率の変動)を補正することができる。また望遠鏡がトラッキングさえすれば動きの速い低軌道衛星でも適用でき、恒星時追尾で実行すれば人工天体でない、一般の天体のライトカーブ観測も可能である。

4 試験観測結果

美星スペースガードセンターの1m望遠鏡を用いて試験観測を実施した。観測時のパラメーターは以下の通りである。

- 1m望遠鏡+モザイクCCDカメラ「Volante」
- W フィルター(4900-9100 Å)

- ピクセルスケール 2" / pix (2x2 ビニング)
- 電荷転送速度 7.5pix/sec (sidereal rate、電荷転送タイミング 0.14 秒/pix)
- 30 秒露出

以下に観測例を示す。

● 観測例 1

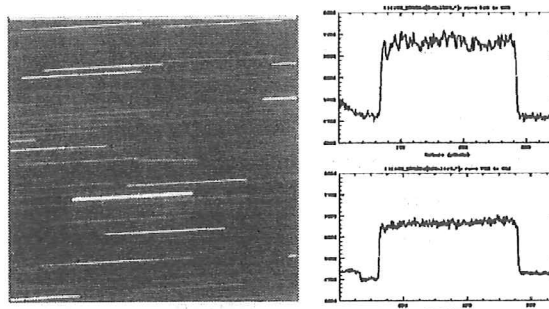


図2 観測例1。左：観測画像。右上：目的天体の像を切り出したプロファイル、右下：比較星のプロファイル。

● 観測例 2

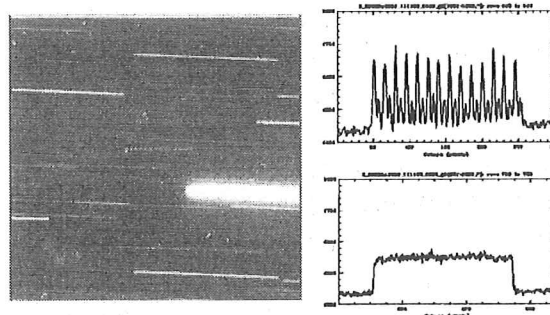


図3 観測例2。図2と同様。

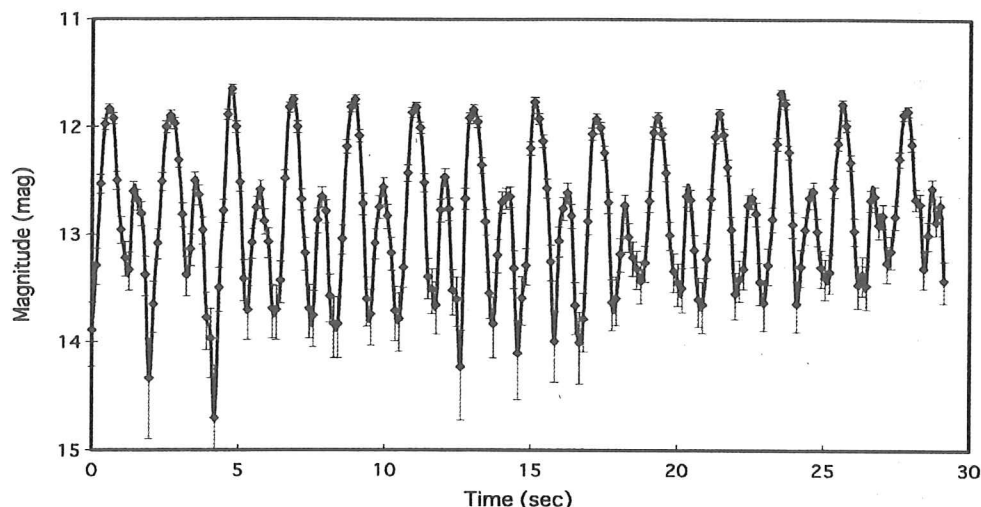


図4 観測例2 (図3) の結果を時間(横軸)、等級(縦軸)にしたグラフ。時間サンプリング間隔は0.14秒であるがシーイングの影響があるため事実上の時間分解能は0.39秒。

観測例1、2ともにターゲットは静止軌道上の物体であり、観測例1は光度変化のほとんど無い例、観測例2は大きな光度変化の見られた例である。観測例2のプロファイルについて、横軸を時間、縦軸を等級に書き直したのが図4である。このデブリの光度変化はダブルピークを示し、その周期は約2.1秒、最大振幅(peak-to-peak)が約2等であることがわかった。

5 限界等級の見積もり

試験観測のデータをもとに、S/N=3となる限界等級を算出した。結果は表1の通りである。1 pixel当りに入射する天体からの光は電荷転送速度に反比例し、一方バックグラウンドにのるノイズは露出時間が短いほど小さくなる。

表1 TDI短周期光度変化観測モードにおける限界等級

	サンプリング間隔 (電荷転送タイミング)		
	1秒	0.14秒	0.05秒
30秒露出	16.2等	14.1等	13.0等
5秒露出	17.2等	15.1等	14.0等
1秒露出	18.0等	15.9等	14.8等

たとえば、電荷転送タイミング1秒 (=電荷転送速度1 pix/sec) の時30秒露出で限界は16.2等、電荷転送タイミングを0.05秒にすると30秒露出の時は限界13等であるが1秒露出にすれば限界は14.8等に改善される。また14等よりも明るい天体であれば0.05秒の時間分解能で5秒間観測が可能であるということになる。

6 まとめ

望遠鏡でトラッキング(追尾)している天体をTDIモードで観測し、電荷転送方向に延びた像を使用して光度の変化を調べる試験観測を実施した。ターゲットに選んだうちの一つの静止デブリについて、周期2.1秒で最大振幅2等、ダブルピークを示す光度変動をとらえる事ができた。この観測手法は、望遠鏡がトラッキングさえすれば低軌道の衛星でも適用可能であり、また望遠鏡を恒星時追尾にすれば人工天体ではない一般の天体にも適用できる。

参考文献

- 1) 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, pp.53-56, 2011

(2011年12月17日受付, 2012年3月1日受理)

◆ Author Index

Fuse, T.	9
Hasegawa, O.	4
Hasegawa, H.	40
Hirose, C.	53
Ito, T.	50
Ishiguro, M.	40
Katayama, M.	72
Kato, A.	78
Kinoshita, D.	26
Kinoshita, Y.	33
KItazato, K.	40
Kubo-oka, T.	69
Kudo, N.	53
Kuroda, D.	40, 69
Kurosaki, H.	13, 21, 59, 64
Matsuda, I.	53
Nakayama, H.	53
Nishiyama, K.	40, 45, 48
Okudaira, K.	4
Okumura, S.	40, 45, 53
Onose, N.	4
Sakamoto, T.	40, 45, 53, 57
Sato, M.	33
Someya, K.	53
Takahashi, N.	1, 37, 40, 45, 53
Takeuchi, Y.	33
Tanabe, K.	45
Tanaka, W.	53
Urakawa, S.	37, 40, 45
Yamaguchi, T.	17
Yanagisawa, T.	13, 21, 53, 59, 64
Yoshida, F.	8
Yoshikawa, M.	17, 37, 40, 45,