

DESHIMA 2.0 大気吸収補正を考慮した chop-and-nod 法の解析コードの開発

山中 珠里(名古屋大学)

谷口 暁星, 田村 陽一(名古屋大学), 竹腰 達哉(北見工業大学), 藤田 真司(統計数理研究所), 遠藤 光(TU Delft), 唐津 謙一(SRON)

DESHIMA (DEep Spectroscopic High-redshift Mapper) は、ASTE 10 m 望遠鏡に搭載されている超伝導フィルターバンクを用いたミリ波サブミリ波分光器である。2023 年に搭載された DESHIMA 2.0 は観測帯域や装置能率が大幅にアップデートされたほか、ON 点観測効率の向上のため高速 ON-OFF 切替機構 (sky chopper) が追加された。この機構では観測点ごとの光学特性のインバランスを補正するために、異なる OFF 点を観測する chop-and-nod 観測を一般的に用いる必要がある。しかし、サブミリ波帯の観測において必要不可欠な大気透過率の補正を組み込んだ解析手法はこれまで検討されていなかった。本研究では、DESHIMA 2.0 における chop-and-nod 法の確立のために、大気透過率補正を考慮した chop-and-nod 観測データの解析コードを開発した。尚且つ、開発したコードを DESHIMA の解析ソフトウェア de:code に組み込み、惑星の観測データを使って手法の妥当性を確認した。解析結果を主ビーム能率の誤差を考慮した惑星モデルと比較した結果、スペクトル強度がモデルの誤差範囲内に収まり、大気透過率の低い周波数帯の落ち込みも改善した。また、大気透過率の大気吸収補正の実証とノイズレベルが許容範囲内であることも示され、DESHIMA2.0 観測データの解析における手法の有用性が証明された。

Introduction

DESHIMA2.0(Deep Spectroscopic High-redshift Mapper)

ASTE 10 m 望遠鏡に搭載されているサブミリ波分光器
観測効率の大幅な向上と遠方銀河のサイエンスの発展を目指す

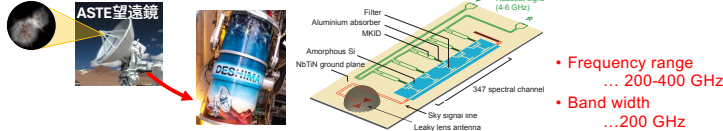
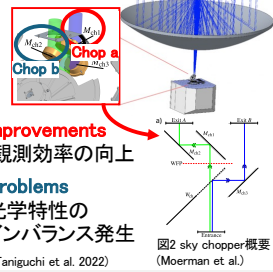


図1 DESHIMA2.0 概要
(Taniguchi et al. 2022)

➤ Sky chopperの搭載



Improvements
・観測効率の向上

Problems
光学特性の
インバランス発生

本研究の目的

大気透過率補正を考慮した chop-and-nod 観測データの解析手法を開発し、妥当性を確認する

➤ Chop-and-nod観測法

- ✓ 光学特性のインバランス補正
- ✓ 大気雑音の除去

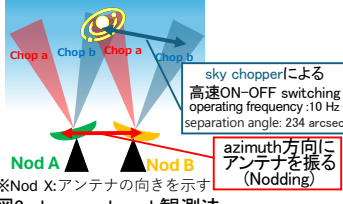


図3 chop-and-nod 観測法

Result

Neptune

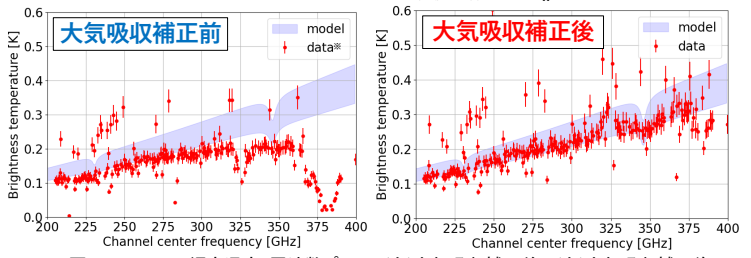


図5 Neptuneの輝度温度-周波数プロット (左)大気吸収補正前 (右)大気吸収補正後

Uranus

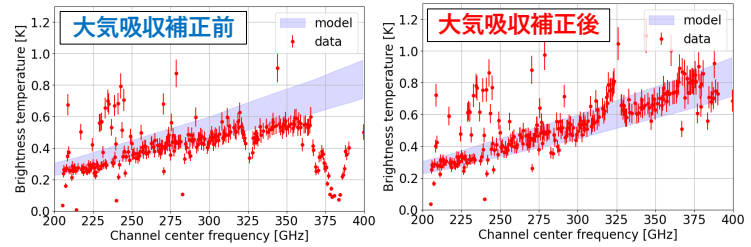


図6 Uranusの輝度温度-周波数プロット (左)大気吸収補正前 (右)大気吸収補正後

- ✓ スペクトル強度は η_{mb} の誤差範囲を考慮したモデルに収まった
- ✓ 大気透過率の低い周波数帯スペクトルの落ち込みは改善

解析情報 マージソフト: de:merge version:2024.8.0,
DDB(DESHIMA DataBase) version: 20240713,
解析ソフト: de:code(Taniguchi, A., Yamanaka, J., & Fujita, S., Version 2024.9.1)

Method

1. 解析手法の開発 (Brackenhoff, S. A. (2021). "A data model and algorithm for detecting spectral lines and continuum emission of high-redshift galaxies using DESHIMA 2.0" (Master's thesis). Delft University of Technology. (未公開))

大気透過率補正を考慮した chop-and-nod 観測データの解析手法を開発

通常の受信機における大気補正: $T_A^* \equiv T_{\text{source}} - T_{\text{sky}} / (T_{\text{amb}} - T_{\text{sky}})$ (T_A^* : 真の観測温度
 T_{amb} : 黒体の温度)

Antenna position A (Nod A)の
観測方程式

$$T_{A,\text{nodA}}^* \equiv T_{\text{amb}} \frac{T_{\text{Ab}} - T_{\text{Aa}}}{T_{\text{amb}} - T_{\text{Aa}}}$$

装置の各状態の温度は T_{Aa} と表す
Ex) Nod Aのchop bの観測温度は T_{Ab}

装置の各状態(Nod&chopの英文字で表現)

図3 chop-and-nod 観測と
各物理量の定義

アンテナ駆動

得られるスペクトル

輝度温度

周波数

平均

最終的なスペクトルに期待すること

✓ 大気吸収補正

✓ Sky chopperの切り替えによる光学特性の
インバランス補正

周波数

輝度温度

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

Antenna position B (Nod B)の
観測方程式

$$T_{A,\text{nodB}}^* \equiv T_{\text{amb}} \frac{T_{\text{Ba}} - T_{\text{Bb}}}{T_{\text{amb}} - T_{\text{Bb}}}$$

装置の各状態の温度は T_{Ba} と表す
Ex) Nod Bのchop aの観測温度は T_{Bb}

装置の各状態(Nod&chopの英文字で表現)

図3 chop-and-nod 観測と
各物理量の定義

アンテナ駆動

得られるスペクトル

輝度温度

周波数

平均

最終的なスペクトルに期待すること

✓ 大気吸収補正

✓ Sky chopperの切り替えによる光学特性の
インバランス補正

周波数

輝度温度

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

周波数

Discussion

1. 大気観測データとモデル (Pardo et al. 2001)のfitting

	大気モデル	実測値
$T_{\text{atm}}[\text{K}]$	268.8	267.4
PWW [mm]	0.62	0.50 - 1.0*

*APEXのradio meterから得た値

➤ 本解析法が実際に大気吸収成分を補正していることを証明

2. 天体信号なしの chop-and-nod 観測によるノイズレベルの検証

補正後のノイズが
補正前のノイズ / η_{atm}
を上回れば望ましい

	期待値[mK]	実測値[mK]
標準偏差	1.12	1.17

(大気透過率一定の250-300GHzを対象範囲とした)

➤ 増大するノイズレベルは期待値と概ね
コンシステントである

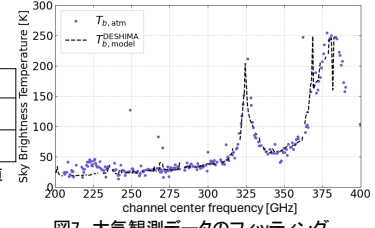


図7 大気観測データのフィッティング

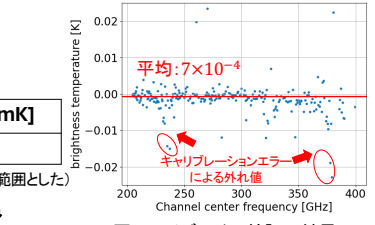


図8 ノイズレベル検証の結果

大気補正を考慮したChop-and-nod 観測法は
DESHIMA2.0観測データの観測手法として有用であることが示された

Conclusion

モデルとデータの比較において全ての評価項目を達成されたとともに、
大気吸収補正の実証と許容範囲内のノイズレベルが確認された

→ DESHIMA2.0観測データの解析における手法の有用性が証明された

DESHIMA観測における今後の課題

- ・キャリブレーションのアップデートによる外れ値の改善
- ・ノイズレベルのより詳細な解析

※惑星観測モデル $= T_{\text{obs}} \times \eta_{\text{mb}} \times \left(\frac{\Omega_{\text{source}}}{\Omega_{\text{mb}}} \right)$

η_{mb} : 主ビーム能率, DESHIMA2.0では0.38-0.51
 Ω_{mb} : 主ビーム立体角
 $T_{\text{obs}}, \Omega_{\text{source}}$: 惑星の輝度温度, 立体角

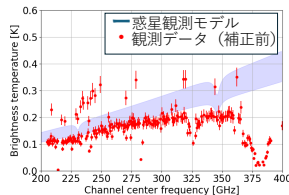


図4 大気補正前のNeptune観測データと
惑星観測モデルの比較