

位相回復法による単一電波望遠鏡鏡面誤差の調査

杉本正宏 (国立天文台 TMT プロジェクト)

概要(Abstract)

位相回復法 (PR) を用いた鏡面誤差測定は古くから知られるが、精度は信号対雑音比(SN)に依存し十分な検証例が少ない。本研究では ASTE 望遠鏡を対象に、SN や他の誤差要因による精度をシミュレーションで評価し、サブミリ波帯での PR 法による鏡面誤差推定が可能である見通しを得た。また ASTE での実測準備状況も報告する。

1. ASTE 鏡面の現状

Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)[1]はチリ・アタカマ高地の標高 4800m に設置された口径 10m のミリ波・サブミリ波単一望遠鏡である。望遠鏡が設置された初頭(2002-2005 年頃)は、人工信号源を用いたホログラフィー測定および主鏡パネル調整が実施され、鏡面精度 20um rms を達成している[1]。その後、現在に至るまで鏡面調整を行うことなく運用観測が続けられてきた。その間に測定されたアンテナ開口能率の値は年々低下する傾向[2,3]を示しており、近年の能率値から概算される鏡面誤差は 50um rms 程度と想定される。

2. 研究目的

熱変形・重力変形・風荷重等による主鏡面精度の劣化を、焦点面付近において補償することを最終目標として掲げ、ASTEにおける実証実験を2025年からスタートした。このためにはまず、補正すべきASTE主鏡面の誤差分布を正確に把握する必要があるが、初期運用期に利用された人工信号源を用いたホログラフィーシステムは現状では利用することができない状態である。このことから、天体観測データから鏡面誤差を推定する手法として、位相回復法([4], PR=Phase Retrieval)およびOut-of-Focusホログラフィ法([5], OoF)を用いることとした(図1)。PR法およびOoF法は、高精度で鏡面誤差(位相誤差)を決定するには高いSignal-to-Noise (SN)比が必要であることが知られている。このことから、現状のASTE鏡面誤差(~50um rm)をどの程度の精度で決定可能か確認する目的で、シミュレーションも合わせて実施し、SN等の影響も確認した。

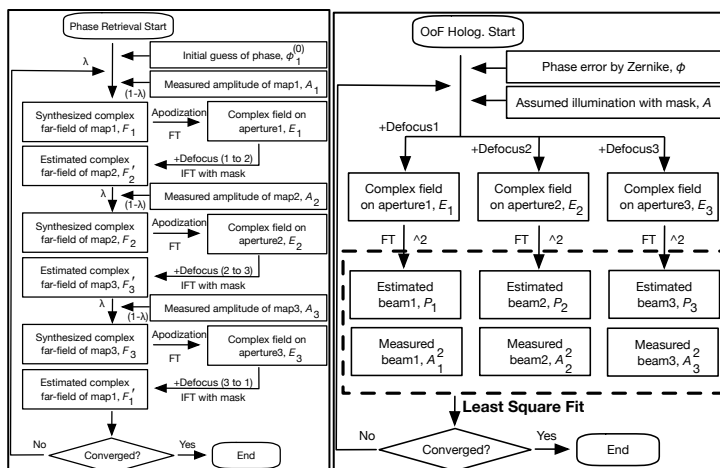


図 1: PR(Phase Retrieval)法および OoF (Out-of-Focus)法の解析フロー。

3. 鏡面誤差分布の測定

図 2 に ASTE/DASH345 受信機を用いた金星のマッピング観測の結果(副鏡オフセット無)を示す。全てのスキャンが天体中心を通過するような OTF 観測(24 スキャン)を行う。天体の強度はアンテナ温度 (T_a^* [K])に較正されており、およそ $T_a^*=90\text{K}$ 程度であった。惑星の輝度温度 $T_b=278\text{ [K]}$ [6]と観測当時の惑星視直径(24.3 秒角)の情報と合わせることで開口能率は 44%と求まり、これは約 52 $\mu\text{m rms}$ の鏡面精度に相当する。

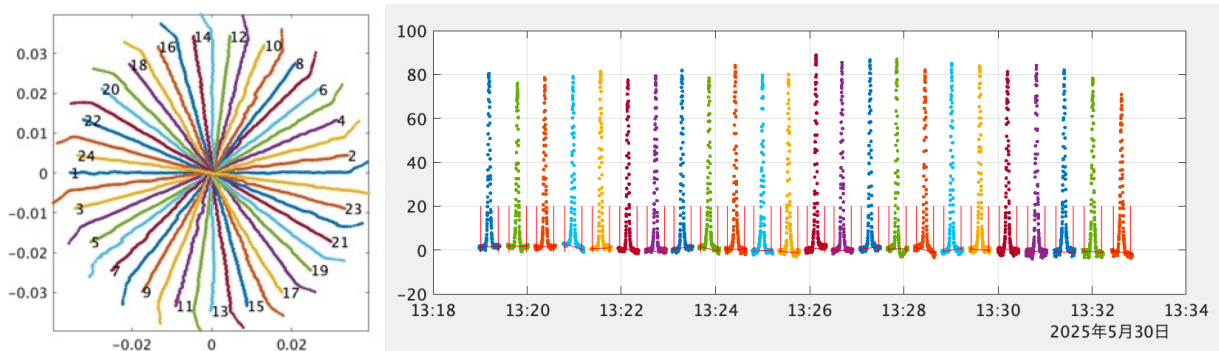


図 3: ASTE/DASH345 受信機を用いた金星での測定結果(2025/5/30)。左)スキャンパターン。測定した 345GHz のビームサイズの 10 倍程度~200 秒角のスキャン領域。右)金星測定(副鏡オフセット無)のアンテナ温度(T_a^* [K])。 $T_a^*=80\sim 90\text{K}$ 程度で、これは鏡面誤差 52 $\mu\text{m rms}$ 程度に相当。測定は外気温 ~ 0 度、仰角 60 度程度で実施。

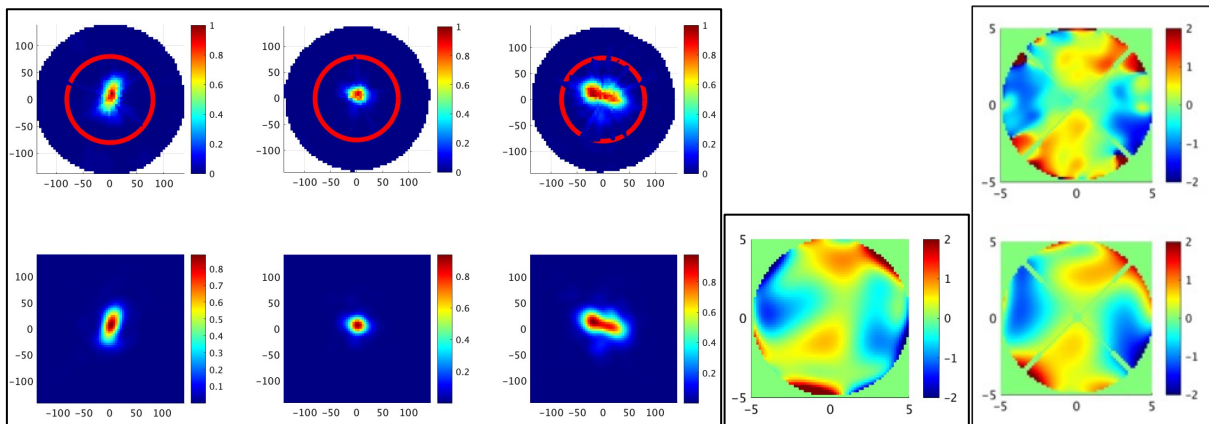


図 2: 左図)上: 測定された金星のマップ画像 (左:副鏡オフセット $+0.8\lambda$, 中央: 副鏡オフセットなし, 右:副鏡オフセット -0.8λ)。右図)下: OoF 法(Zernike 動径次数 7 まで利用)によって再現されたビーム形状。中央図) OoF 法で求めた位相誤差分布[rad]、52.4 $\mu\text{m rms}$ に相当。右図)上: PR 法で求めた位相誤差[rad]、下: Zernike(動径次数 7 まで)でのフィット結果、48.6 $\mu\text{m rms}$ に相当。位相誤差マップは offset/tip-tilt/defocus/coma 成分は非表示。

図 3 に OoF 法および PR 法による解析結果を示す。副鏡をオフセット($\pm 0.8\lambda$)させたものを含めて合計 3 枚のマップデータから鏡面誤差(位相誤差)を推定する。OoF 法および PR 法で求めた位相誤差はどちらも非点収差的な分布を示しており、それぞれ 52.4 $\mu\text{m rms}$ および 48.6 $\mu\text{m rms}$ と非常に近い結果であり、かつアンテナ温度から想定される鏡面誤差値とも矛盾しない。この誤差分布は鏡面の 20 年間

に及ぶ経年変化によって生じた可能性が考えられるが、今後更なるデータを取得し、再現性確認や外気温・仰角依存といった環境依存についても調査を継続することで、ASTE 鏡面の包括的な現状・振る舞いを明らかにしたい。

4. シミュレーションによる測定精度の推定

ASTE で測定された鏡面誤差(位相誤差)の確らしさを検証するため、OoF/PR 法の誤差要因項目について影響を調査するためシミュレーションを実施した。本発表では、誤差要因のうち SN 比による影響を紹介した。シミュレーションでは、Zernike 係数(動径次数 7 まで利用)をランダムに組み合わせ、30~50um rms 相当になるような位相誤差分布を作成(インプット位相)、Gauss 照度分布と合わせてフーリエ変換することでビームパターンを生成させる(図 4)。作成されたシミュレーションマップにノイズ等を加え、PR/OoF 法の解析を行い、その出力結果とインプット位相を比較することで、誤差量を見積もる。

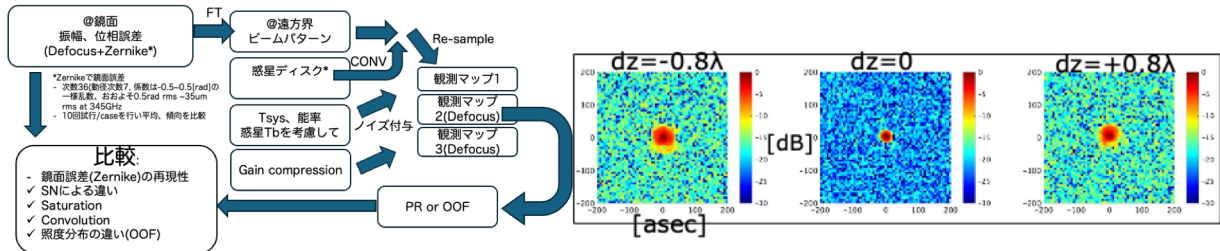


図 4: 左)シミュレーションの流れ。右)ノイズ(中央: SN100, 左右:SN~40)を付与したシミュレーション用ビームマップ。

図 5 に SN100 のノイズを付与した場合(デフォーカスマップは SN40, $dz=\pm 0.8\lambda$)の結果を示す。Zernike 係数をランダムに変えたインプット位相が異なる 10 ケースについて示している。OoF 法の出力位相(Result)は精度良く復元されていることがわかる。PR 法の出力はノイズを含むが、Zernike でフィットをかけると OoF 同様にインプット位相が復元していることが確認できる。

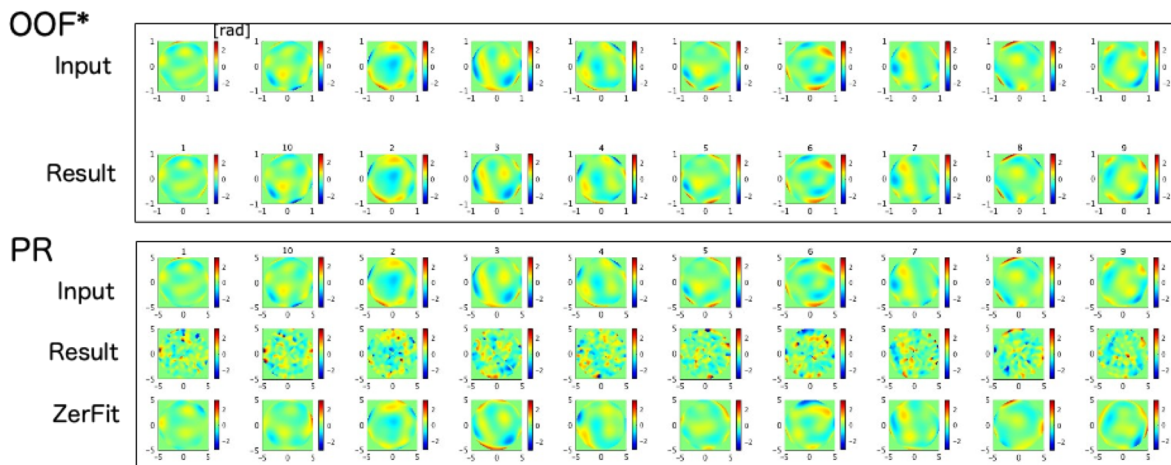


図 5: SN100 (副鏡デフォーカスマップは SN40, $dz=0.8\lambda$)。

OoF 法および PR 法の出力マップとインプット位相マップの差分を作成し rms を計算、インプット位相マップの rms との比を取ると、OoF 法では平均で 0.1-0.2 程度、PR 法では 0.2-0.4 程度であった。これ

は、インプット位相が 50um rms 程度とするなら、OoF 法の誤差は 5-10um rms 程度、PR 法の誤差は 10-20um rms 程度ということの意味する。

ASTE でのサブミリ波帯観測(350GHz 帯)では、明るい惑星を使えば、SN100 は十分実現可能であり、上述のシミュレーション結果と合わせると、OoF/PR 法を用いて十分な精度で鏡面誤差を復元できると期待される。

5. まとめ

- ASTE での鏡面誤差分布を調査するための試験観測を実施した。観測では非点収差的な 50um rms 程度の鏡面誤差分布が確認された。
- PR/OoF 法のシミュレーションを実施し、誤差要因の影響を調査した。明るい天体(SN>100,惑星など)を用いれば、50um rms 程度の鏡面誤差を十分に評価可能である結果を得た。

今後、実測データを増やし、再現性の確認や、仰角・環境変化に対する鏡面変化の確認を行なっていきたい。

6. 謝辞

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers JP25K07360.

7. 参考文献

- [1] Ezawa, H., Kawabe, R., Kohno, K., & Yamamoto, S. 2004, Proc. SPIE, 5489, Ground-based Telescopes, ed. J. M. Oschmann (Bellingham, WA: SPIE), 763
- [2] Ito, T., et al. 2018, Proc. SPIE, 10708, 107082V
- [3] Moerman, A., et al. 2025, JATIS, 11(2), 025007
- [4] Morris, D. 1985, IEEE Trans. on Ant. and Prop., AP-33,749
- [5] Nikolic, B., Hills, R. E., & Richer, J. S. 2007, A&A, 465, 679
- [6] Butler, B. 2012, ALMA memo 594