

京大 3.8m 望遠鏡における極限補償光学系の開発

夏目 典明 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

Abstract

地上から系外惑星を観測する場合、地球大気の乱流によって光の波面は歪められてしまい、空間分解能は低下し、主星からの散乱光によってコントラストは制限される。極限補償光学とはその大気による光の波面の歪み(収差)をリアルタイムで計測・補償して、空間分解能とコントラストを向上させる装置である。地球型惑星の直接撮像を達成するためには、観測波長の 30 分の 1 まで収差を低減することが要求される。我々は、TMT と同じ分割式望遠鏡の京大 3.8m 望遠鏡に極限補償光学装置のプレカーサーを取り付けて、実証を行なう予定であり、地球大気によって生じる収差を一次、低次、高次に分けて計測・補償し、観測波長の 30 分の 1 まで収差を低減することを目指す。まず我々は、一次、低次の収差を Shack-Hartmann 波面センサを用いて計測し、最大ストローク 35 μm の Tip/Tilt 鏡、最大ストローク 15 μm の 88 素子可変形鏡によって補償を行なう光学系を実験室において構築した。ループを 5Hz の速度で制御し、岡山の大気を模擬した環境で、収差のリアルタイム計測・補償を行った。本稿では、極限補償光学系の概要、および室内実験の結果について報告する。

1 Introduction

現在、800 を超える系外惑星が、主に間接的な方法(視線速度法やトランジット法)で発見されており、惑星の質量や半径が導出され、系外惑星に関する研究に貢献している (Guillot, 2005)(Fortney et al. 2007)。今後の系外惑星研究を進める上で、系外惑星を直接観測する事が重要となってくる。なぜなら直接観測は、間接法では得られない、惑星の温度、アルベド、大気組成等を推定することができ、惑星形成論などに新たな制限を与えられるからである (Neville et al. 1998)。直接観測を達成するためには、暗い星を検出するための高感度、主星と惑星を分離するための高空間分解能、主星と惑星の高い強度比を解消するための高コントラスト、以上の 3 つの条件が必要になる。宇宙望遠鏡から直接観測をすれば、地球大気の影響により光の波面が歪まされることもなく、高空間分解能が達成しやすい。しかし、高感度を達成するために大口径の望遠鏡を打ち上げる必要があり、それは技術的にも予算的にも難しい。そこで我々は、大気の影響を補正する極限補償光学装置、及び主星の回折像のみを低減するコロナグラフを次世代大型望遠鏡 Thirty-Meter-Telescope(TMT)に取り付けて、地球型系外惑星の直接観測を行う事を提案している。本研

究は、地球型系外惑星の直接観測のための極限補償光学装置の開発を目的としており、まずはそのプレカーサーを TMT と同じ分割式望遠鏡の京大 3.8m 望遠鏡¹に取り付けて、実証を行なう予定である。装置の要求性能は H-band で Strehl Ratio(SR)=0.9(Strehl, 1895)(Born et al. 1965) であり、回折限界を達成する事を目標にしている。

2 極限補償光学

一般的な補償光学装置 (Richard et al. 2012) は (1) 大気乱流による光波面の歪みを計測する「波面センサ」(2) 光波面の歪みを補正する可変形鏡 (DM:Deformable Mirror)(Katie et al. 2012)(3) 波面センサから得た情報をもとに可変形鏡を制御する「計算機」、以上 3 つの要素から主に成り立つ。我々の極限補償光学では、波面の歪み(収差)(Born et al. 1965)を、一次、低次、高次の三段階に分けて補正する(図 1)。なぜなら、低次の収差の大きい波面エラーを補正できる程のストロークを持ち、かつ、高次の収差の細かい波面構造を補正できる程の素子数をもつ可変形鏡を製作するのは技術的に難しく、また、装置として

¹<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/>

の安定性が低くなると考えたからである図 2。一次、低次の収差の補正 (Woofers system) に $SR=0.49$ まで向上し、その後高次の収差を補正 (Tweeter system) によって、 $SR=0.9$ を達成する。また、三段階補正の詳細を表 1 にまとめた。以下では、Woofers system のみに焦点を絞り、話をすすめる。

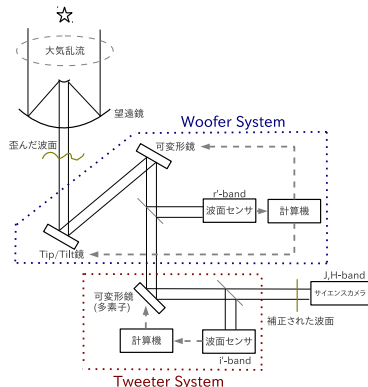


図 1: 極限補償光学装置の概要図。一次、低次収差を r' -band で測定し、Tip/tilt 鏡と可変形鏡でそれぞれを補正する (Woofers system)。次にある程度綺麗になった波面 ($SR=0.49$) を i' -band で測定し、より多素子の可変形鏡で補正する (Tweeter system)。その後補正された ($SR=0.9$) が J,H-band で観測される。

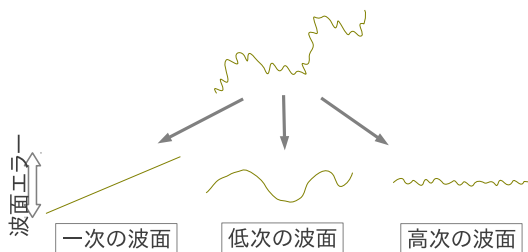


図 2: 収差は次数によって分けられる (Noll, 1976)。一次、低次、高次収差のそれぞれの波面エラーの値は、 $\sim 4.9\text{rad}$ 、 $\sim 2.7\text{rad}$ 、 $\sim 0.8\text{rad}$ であり、またそれぞれの空間周波数は $\sim 0.3/\text{m}$ 、 $\sim 2.2/\text{m}$ 、 $\sim 8.9/\text{m}$ である。

補正用鏡	Tip/tilt 鏡	DM 88-25(Alpao)	Kilo-DM(BMC)
補正する収差	一次 (1,2)	低次 (3~36)	高次 (37~528)
素子数	1	88	1020
最大ストローク (um)	35	15	1.5
制御帯域 (Hz)	85	250	1000
補正後 SR	0.001	0.49	0.9
対応する波面センサ	SHWFS		PDI for WFS

表 1: 一次、低次、高次収差補正用鏡のパラメータ (PDI=Point Diffraction Interferometer(Smartt et al. 1975))

3 Woofers system

3.1 光学設計

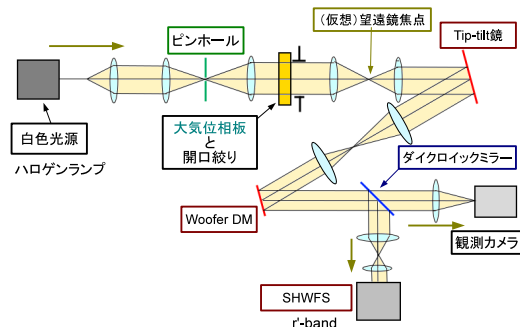


図 3: 白色光源から出た光をピンホールを通すことで、綺麗な波面を生成している。その後大気位相板を通り、岡山上空の大気を再現する。また、開口絞りとレンズで 3.8m 望遠鏡と同じ F 値を持つ収束光を生成し、仮想的な望遠鏡焦点としている。

実験室内に Woofers System の光学系を構築した。概要図を図 3 に示す。本来は色収差をなくするために軸外し放物面鏡を使用すべきだが、納期の関係上アクロマティックレンズで代用した。表 1 に記載した通り、Woofers system の波面センサには低次収差計測に感度をもつ Shack-Hartmann 波面センサ (SHWFS)(Platt et al. 2001) を採用した。我々の SHWFS は Andor 社の sCmosCamera Zyla に焦点距離 8.7mm、64 素子のマイクロレンズアレイを装着したものであり、視野は 10 秒、限界等級は 12 等程度である。また、京大 3.8m 望遠鏡建設予定地である岡山上空の大気乱流を実験室内で作り出すために、フリード長 (Fried, 1966) が H バンドで 35cm となるように、大気位相板 (Steven et al. 2002) を設計した。

3.2 実験と結果

風速 0m/s(大気が静止している状態)、0.5m/s、10m/s、及び岡山上空の典型的な風速である 20m/s の環境を大気位相板によって作り出し、それぞれ補正を行った。AO loop は Matlab 上で構築し、また、その速度はプログラムの性能が低いため、5Hz 程度となった。補正前とそれぞれの補正後の画像を図 4 に示す。風速 0m/s では SR が 0.39 まで向上した。し

かし、風速 10m/s 以上では全く補正できていない結果となった。

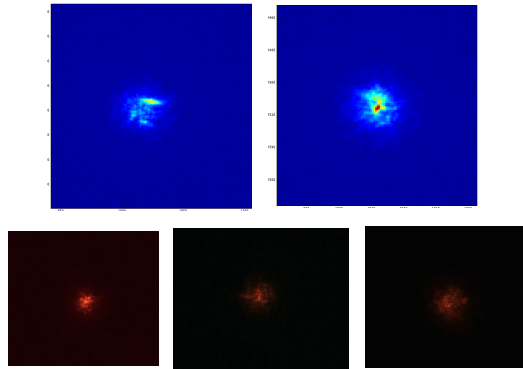


図 4: 補正なし(上段左)、補正あり&風速 0m/s(上段右)、補正あり&風速 0.5m/s(下段左)、補正あり&風速 10m/s(下段中)、補正あり&風速 20m/s(下段右)。上段右は SR=0.31 となった。下段はカメラの性質上 SR を計算することができなかったが、真ん中と右は全く補正できていないことが見て取れる。

3.3 考察と課題

補正できていない理由は AO loop の速度が遅いためであり、プログラムの改善が求められる。現在では、100Hz まで改善されているが、目標の 250Hz にはまだ達成できていない。今後は、軸外放物面鏡を用いる等、実機仕様の光学系を設計しつつ、ソフトウェアの開発を進めていく。

4 Conclusion

系外惑星研究を進めていく上で、従来の間接法での検出ではなく、系外惑星を直接観測する事が重要となってくる。そこで、我々は次世代の大型地上望遠鏡 Thirty-meter-telescope からの地球型系外惑星の直接観測を行うことを提案している。地上から直接観測を達成するためには補償光学が必要不可欠であり、要求される性能は H-band で SR=0.9 である。その要求性能を達成するに我々は、収差を三段階に分けて補正し、2つのループ(Woofler, Tweeter system)で制御するシステムを考案した。TMT のプレカーサーを京大 3.8m 望遠鏡に取り付けて実証実験を行う予定であり、今回はそのための Woofler system のみ

の室内実験を行った。実験結果は要求性能を満たさないものであり、原因はループ速度が 5Hz と遅かったためだと考えられる。現在は、撮像はできていないが、プログラムの計算速度は 100Hz に到達している。今後は、実機仕様の光学系を設計しつつ、並行して送付とウェアの開発を進めていく。

Reference

- Guillot T., 2005, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 33, 493
- Fortney J. J., Marley M. S., Barnes J. W., 2007, ApJ, 659,1661
- Neville Woolf, J. Roger Angel, 1998, AR Vol. 36: 507-537
- Strehl K, 1895, Aplanatische und fehlerhafte Abbildung im Fernrohr, Zeitschrift fur Instrumentenkunde 15 (Oct.), 362-370
- M.Born, E.Wolf, 1965, Pergamon, Sec 9.1
- Richard Davies, Markus Kasper, 2012, AR
- Katie M. Morzinski, Andrew P. Norton, Julia Wilhelmson Evansa, Layra Rezaa, Scott A. Seversona, Daren Dillona, Marc Reiniga, Donald T. Gavela, Steven Cornelissena, Bruce A. Macintosh, and Claire E. Max, 2012, Proc.SPIE, Volume 8253, pp. 825304-825304-14
- M.Born, E.Wolf, 1965, Pergamon, Sec 5
- Robert J. Noll, 1976, JOSA, Vol. 66, Issue 3, pp. 207-211
- Steven M. Ebstein, 2002, Proc. SPIE 4493, High-Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications III
- Fried, D.L., 1966, J. Opt. Soc. Am, 56 No:10, pp. 1372-1379.
- Platt, Ben C.; Shack, Ronald, 2001, Journal of Refractive Surgery 17 (5). PMID 11583233

2013 年度 第 43 回 天文・天体物理若手夏の学校

Smartt, R. N.; W. H. Steel, 1975, Japanese Journal
of Applied Physics 14: 351-356.