

点回折干渉計を用いた南極望遠鏡の波面測定法の開発

奥村大志¹、今田大皓²、永井誠¹、新田冬夢¹、中井直正¹、久野成夫¹

1. 筑波大学、2. ISAS/JAXA

0. 概要

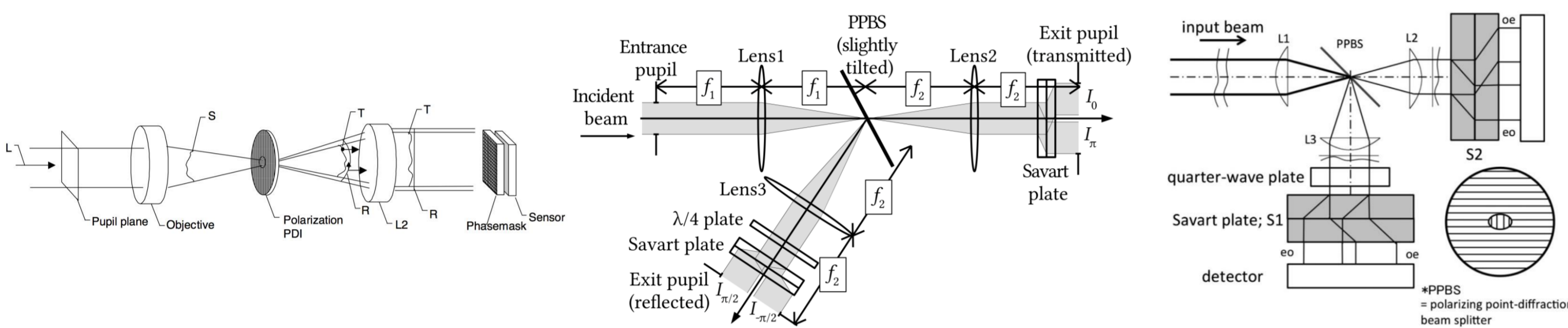
我々は、点回折干渉計(Point-diffraction interferometer, PDI)を用いた、電波望遠鏡の新しい波面測定法を提案する。我々のグループでは南極に10 m級の電波望遠鏡を建設し、最高1.5THzでの遠方銀河観測を行う、南極10 m級テラヘルツ望遠鏡計画を推進している。1.5THzでの観測を行うためには、10 μ m以下の鏡面精度を求められる。

本研究では、偏光ビームスプリッタ(Polarizing Point-diffraction Beam Splitter, PPBS)を用いたPDIについて議論する。偏波特性をもつ検出器を用いることで、レンズ1枚とPPBSのみで構成された光学系で、焦点面での測定から瞳面の複素電場分布の推定を行う。本発表では考案した系での解析的計算と、物理光学手法を用いたシミュレーションの結果を示す。シミュレーションより、考案した系では瞳面の電場の位相を約 $\lambda/300$ の精度で推定出来ることがわかった。

1. PDIと先行研究

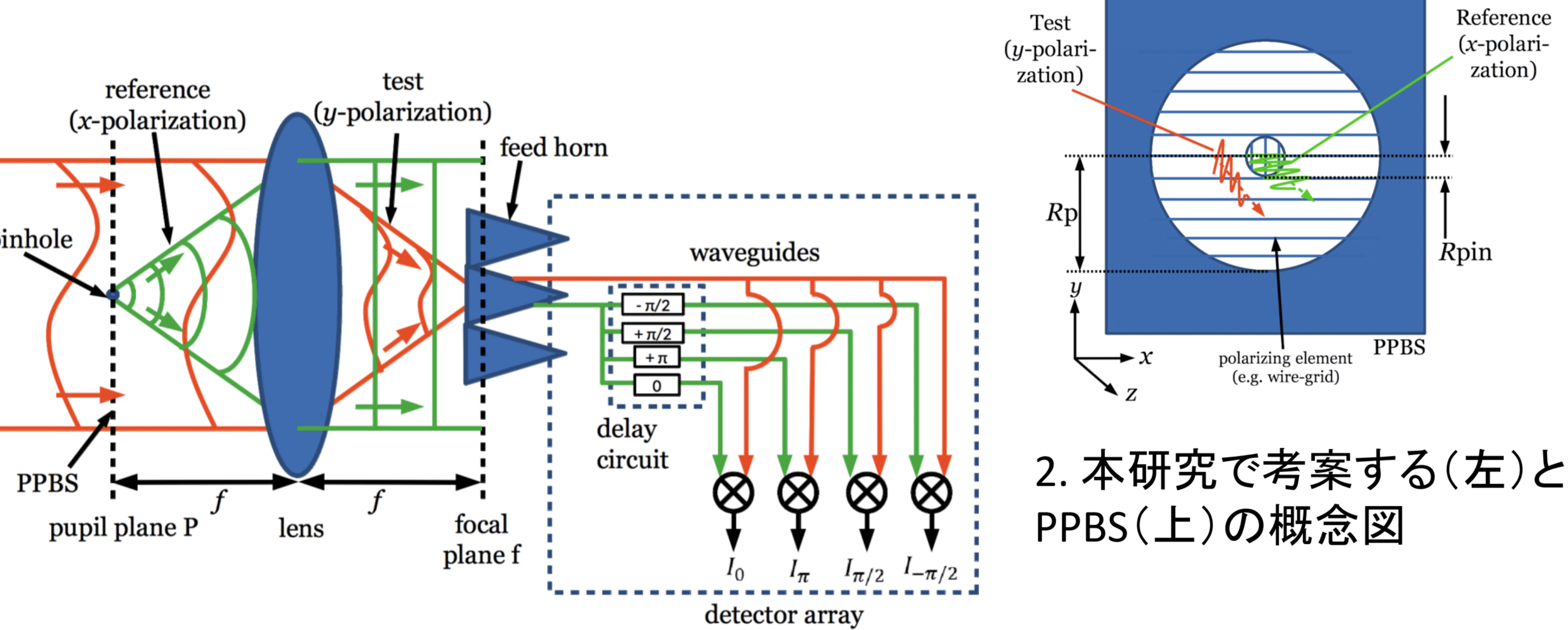
PDIは光路中に入射波の形状を乱さない程度の小さな回折体を置くことで構成される。回折体によって回折した「波面誤差を持たない電磁波(参照波)」と、「入射波の形状を保持した電磁波(試験波)」を用いる。参照波の位相を数通り変調して、それぞれ試験波と干渉させて干渉像を得る。これらの干渉像を演算することで、波面のゆがみを引き出す。波面測定では瞳面での波面形状を知りたいため、瞳面で測定が行われる。

先行研究として、Miller et al. (2004)やImada et al. (2015)、Yamamoto et al. (2015)がPPBSを用いたPDIについて議論している(図1)。PPBSは中心に周辺とは異なる偏光特性のピンホールを持つ。ピンホールを通過した波は参照波、ピンホール以外を通過した波は試験波として働く。PPBSを用いることで、参照波と試験波を直交偏波として分離できる。



1. PPBSを用いたPDIの先行研究で考案された光学系(左から[1]、[2]、[3])

2. 考案する系



2. 本研究で考案する(左)とPPBS(上)の概念図

考案する系(図2)では焦点面での測定から瞳面の複素電場分布を推定する。電波の受信機の特徴である偏波分離して検出できることより、位相変調や干渉を回路上で行う。これらの特徴から簡素な光学系で波面を測定出来る。観測に用いる光学系での波面測定を、PPBSの設置と検出器の換装で行うことが出来る。

3. 解析的計算

瞳面における電場分布を波面誤差 $w(x_p, y_p)$ を用いて以下のように表す。

$$\vec{E}_p(x_p, y_p) = \begin{pmatrix} E_{p,x}(x_p, y_p) \\ E_{p,y}(x_p, y_p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \exp[iw(x_p, y_p)] \\ E_y \exp[iw(x_p, y_p)] \end{pmatrix}$$

ここで E_x と E_y は複素定数、 $w(x_p, y_p)$ は瞳面の中心で $w(0,0) = 0$ であるとする。 x_p と y_p は瞳面上の座標を表す。焦点面に作る電場分布 $\vec{E}_f(x_f, y_f)$ は $\vec{E}_p(x_p, y_p)$ とのフーリエ変換の関係で書くことが出来る、

$$\vec{E}_f(x_f, y_f) = \frac{i}{\lambda f} \iint_P \vec{E}_p(x_p, y_p) \exp\left[i \frac{k(x_p x_f + y_p y_f)}{f}\right] dx_p dy_p$$

となる。ここで k は波数($= 2\pi/\lambda$)である。積分範囲の P はピンホールとそれ以外の部分(アウター)から構成される。ここで仮定として「入射波に両偏波の振幅が等しく同位相となる直線偏波($E_x = E_y = E_0$)」を考える。上式を積分範囲で分ける。

$$\begin{aligned} A_x(x_f, y_f) &= A_x(x_f, y_f) = A(x_f, y_f) \\ &= |A(x_f, y_f)| \exp\left[i \frac{\pi}{2}\right] \dots \text{ピンホールを通過した電磁波} \\ B_x(x_f, y_f) &= B_x(x_f, y_f) = B(x_f, y_f) \\ &= |B(x_f, y_f)| \exp[i\phi^B(x_f, y_f)] \dots \text{瞳面を通過した電磁波} \end{aligned}$$

ピンホールが十分小さければ $w(x_p, y_p) \approx w(0,0)$ となり、以下のように解ける。

$$A(x_f, y_f) = i \frac{k R_{pin}^2}{f} \frac{J_1\left(\frac{k R_{pin}}{f} r_f\right)}{\frac{k R_{pin}}{f} r_f}$$

$A(x_f, y_f)$ は設計による既知の関数として書けることがわかる。これより参照波と試験波は

$$\begin{aligned} E_{f,x}(x_f, y_f) &= A(x_f, y_f) && \text{: 参照波} \\ E_{f,y}(x_f, y_f) &= -A(x_f, y_f) + B(x_f, y_f) && \text{: 試験波} \end{aligned}$$

と書ける。参照波の位相を4通り変調し、それぞれ試験波との干渉像($I_0, I_\pi, I_{\pi/2}, I_{-\pi/2}$)をとる。これらの干渉像を演算すると以下の関係がわかる。

$$\frac{\sqrt{2I_0(x_f, y_f)}}{|E_0|} = |B(x_f, y_f)|$$

$$\frac{I_{\pi/2}(x_f, y_f) - I_{-\pi/2}(x_f, y_f)}{I_0(x_f, y_f) - I_\pi(x_f, y_f) + 2|E_0|^2 |A(x_f, y_f)|^2} = \tan\left(\phi^B(x_f, y_f) - \frac{\pi}{2}\right)$$

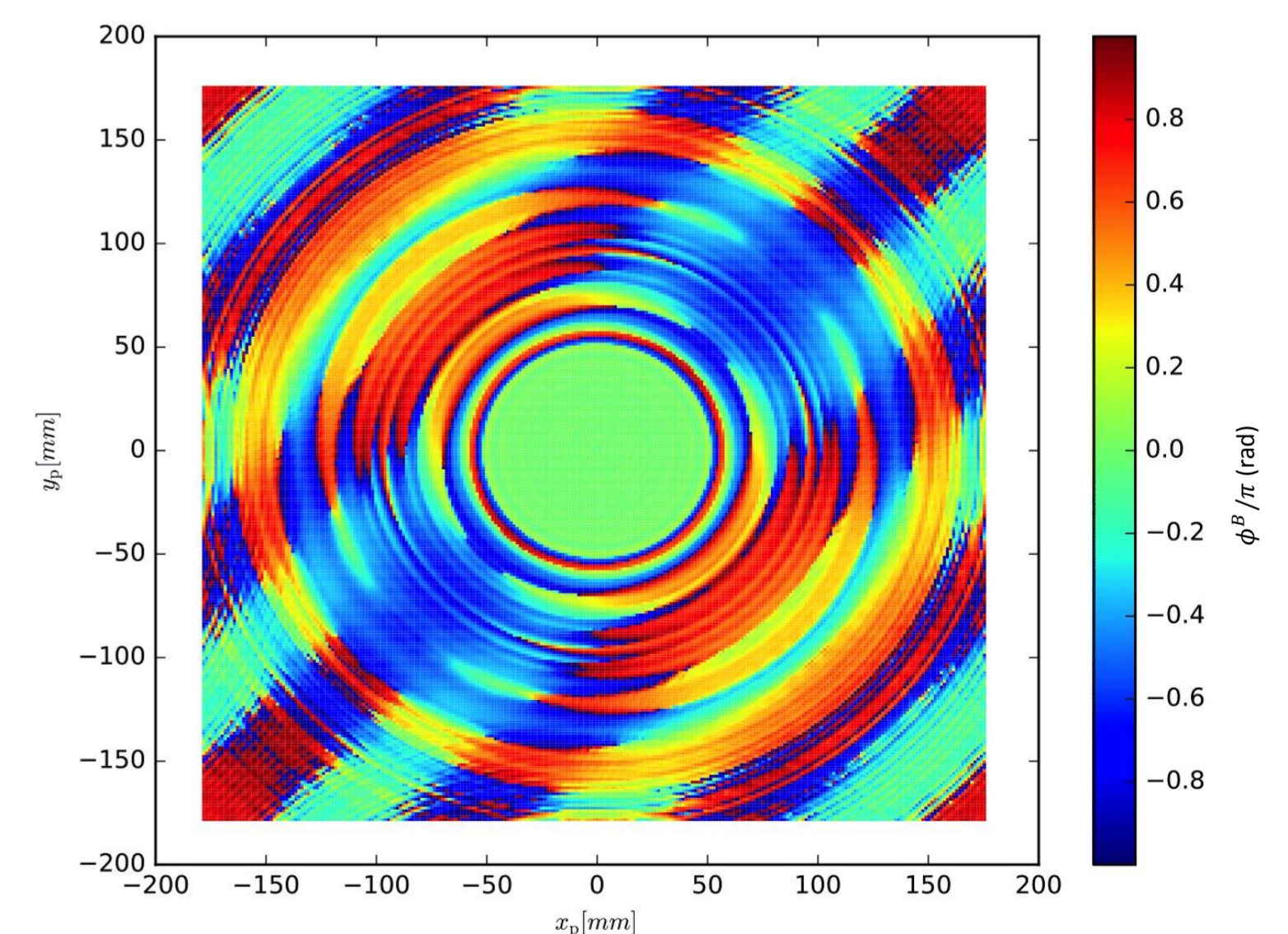
以上の結果より焦点面の電場分布 $|B(x_f, y_f)| \exp[i\phi^B(x_f, y_f)]$ が求まる。瞳面と焦点面はフーリエ変換の関係にあるので、

$$\begin{aligned} \vec{E}_p(x_p, y_p) &= \frac{-i}{\lambda f} \iint_P |B(x_f, y_f)| \exp[i\phi^B(x_f, y_f)] \exp\left[-i \frac{k(x_p x_f + y_p y_f)}{f}\right] dx_f dy_f \end{aligned}$$

と書ける。よって焦点面での測定から瞳面の電場分布が計算できることを示した。

4. 数値計算

解析解を用いて、物理光学シミュレーション(GRASP, TICRA社 [4])による数値計算を行った。 $\lambda = 1[\text{mm}]$ 、 $f = 500[\text{mm}]$ 、 $R_p = 50[\text{mm}]$ 、 $R_{pin} = 1.25[\text{mm}]$ の設定である。図3は推定した瞳面の電場の位相を表している。瞳面内でのRMSは0.0211[rad]である。これは $\lambda/297$ に相当し、3.4[μ m]($\lambda = 1[\text{mm}]$)の精度で推定できることになる。



3. 推定した瞳面の電場の位相

5. 結論

本発表では、偏波測定や回路上での操作という電波領域での特性を利用した系において、焦点面の複素電場分布を計算し、そこから瞳面の複素電場分布を推定する手段を原理的に示した。解析解を用いた数値計算から約 $\lambda/300$ の精度で瞳面の位相を推定できることがわかった。望遠鏡で実装する際、PPBSの設置と検出器の換装で考案した系を実現できる。このことは新たに建設する望遠鏡だけでなく、既存の望遠鏡での実装も考えることが出来る

[1] James Miller et al., Proc. SPIE, 5531, 264 (2004)
[2] Hiroaki Imada et al., Applied Optics 54, 7870 (2015)
[3] Kodai Yamamoto et al., Applied Optics 54, 7895 (2015)
[4] TICRA Engineering Consultants, "Reference Manual for GRASP8" (2003)