

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17598

研究課題名(和文) 焦点面における位相差を用いた電波望遠鏡の鏡面形状測定法の開発

研究課題名(英文) Development of surface measurement of radio telescope dish with phase on focal plane

研究代表者

永井 誠 (NAGAI, Makoto)

筑波大学・数理物質系・研究員

研究者番号：50522877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：電波望遠鏡がその能力を発揮するには、アンテナ鏡面の形状を測定・調整し、理想的に保つことが欠かせない。大型化・高周波化・広視野化を目指す次世代電波望遠鏡においては、鏡面形状測定法も重要な開発項目である。本研究では、新たに提案した焦点面位相差法の原理検証を目指し、小型電波望遠鏡を開発した。焦点面位相差法の原理の理論的な検討も並行して進めた。この検討の中で、基礎となるアンテナ理論において新しい洞察を得た。

研究成果の概要(英文)：To make a radio telescope work effectively, it is necessary to measure and adjust the surface of its mirrors so that they are in ideal shape. Since next-generation radio telescopes are to have larger dishes, higher target frequencies, and wider field of view, development of mirror surface measurement is needed. This study is aim to verify the principle of a new method which measures wave phase on the focal plane, and assembled a small radio interferometer. Theoretical research was also made and some results in antenna theory were obtained.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波望遠鏡 鏡面測定法

1. 研究開始当初の背景

(1) 角分解能と感度のより高い電波望遠鏡を作ることは、口径がより大きく形状がより精密な主鏡面を作ることへの挑戦である。電波望遠鏡の観測波長が短いほど鏡面形状の正確さは重要性を増す。近年、ミリ波・サブミリ波からテラヘルツ帯での大口径望遠鏡の計画が世界中で進められている (CCAT, Large Submillimeter Telescope など)。これらの望遠鏡の主目的のひとつは、サブミリ波銀河として観測されるような、ダストに埋もれた星形成銀河を広く、深く、探査することである。このような天体は銀河の形成期や急激な進化段階にあると考えられ、天文学的に極めて重要な対象である。ダストに埋もれた遠方銀河はサブミリ波からテラヘルツ帯で明るく観測される。また、コンフュージョン限界を下げるために大口径の主鏡が必要になる。そのため、大口径 (数 10 m) で高精度 (誤差数 10 μm) のアンテナ鏡面の実現が望まれている。

(2) こうした動向の中で我々のグループは、地上で唯一、テラヘルツ帯の窓がある南極大陸の高原に口径 10 m のテラヘルツ望遠鏡を設置することを想定して、仕様検討と技術開発を進めてきた。この望遠鏡の実現には、南極の過酷な環境下において実施可能な鏡面測定法の確立が必須である。

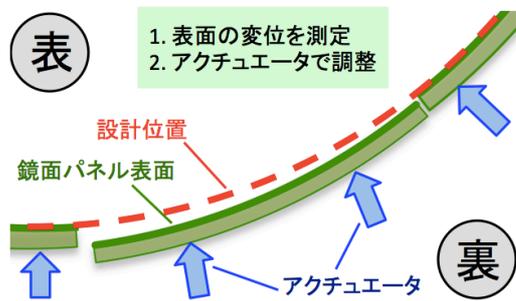


図 1: 鏡面調整

2. 研究の目的

(1) 電波望遠鏡の主鏡面は分割パネルで構成され、鏡面形状の精密測定とパネル位置の調整が必要である。従来では、写真測量法による粗調整をした後に、電波ホログラフィによる精密調整を行う。電波ホログラフィに代わる測定手法として、焦点面位相差法がある。本研究の目的は、光学系焦点面において小型電波干渉計を動作させ、測定される焦点面の位相差から鏡面形状を推定することで、焦点面位相差法の原理検証を行うことである。

(2) 焦点面位相差法には従来の電波ホログラフィに比べて次のような利点がある。

① 光学系全体を通した後の波面を最適化できる。

② 測定に用いる受信機を全て受信機室に納めることができる。そのため、南極のような過酷な環境下でも測定の実施が容易となる。

③ 測定中にアンテナを駆動しない。そのため、測定が機械的な影響を受けない。

3. 研究の方法

(1) 電波望遠鏡の焦点面に設置可能な 2 素子の小型電波干渉計を開発した。参照波として、技術的に容易な 10 GHz 帯のセンチ波 (波長 3 cm) を使い、必要な部品は市販品 (X 帯の規格品) として入手した。中間周波数を低めに設定 (500 MHz) し、安価な低周波数用のベクトル・ネットワーク・アナライザで較正が可能となっている。

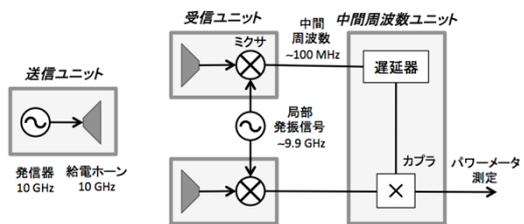


図 2: 小型電波干渉計

(2) これと並行して、焦点面位相差法の理論的な検討も行った。数値シミュレーションの他、波面の情報を用いる他の鏡面形状測定法 (位相回復ホログラフィ、電波点回折干渉計) との関連も検討した。

4. 研究成果

(1) 10 GHz 帯で位相差を測ることができる 2 素子の小型電波干渉計を製作することができた。これを用いて、光学系を通過するビームの位相分布の測定の準備を進めている。

(2) 焦点面位相差法の理論的な検討の中で、基礎となるアンテナ理論において何点か新しい洞察を得た。その 1 つ目は、電波望遠鏡の開口能率が、光学系の瞳の概念を用いることで 5 つの因子に分解されるということである。特に、従来の電波望遠鏡の設計でははっきりと扱われていなかった入射瞳スピルオーバーを定義し、多ビームの電波望遠鏡において必要な因子であることを示した。得られた関係式は次のようなものである。

$$\eta_{ap,10} = \eta_{sp,en} \eta_{bcp,opt} \eta_{mod} \eta_{sp,ex} \eta_{tx,2}$$

カセグレン焦点を持つ電波望遠鏡における入射瞳スピルオーバーは、図 3 で示す光線に相等する。

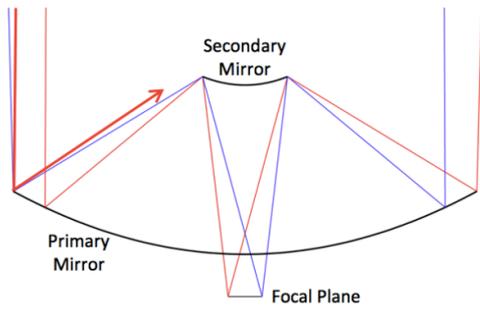


図 3: 入射瞳スピルオーバーに対応する光線

カセグレン焦点を持つ電波望遠鏡の入射瞳を図示すると図4のようになる。

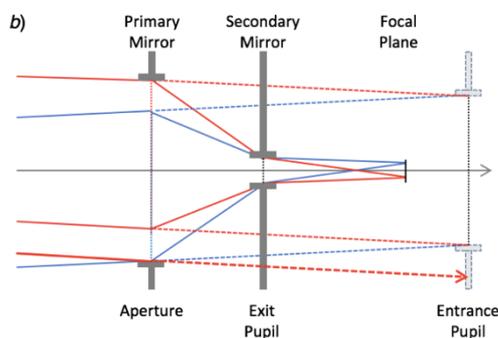


図 4: 入射瞳と入射瞳スピルオーバー

(3) この成果に基づいて、開口能率と光学系の収差の関係を解析的に書き下すことに成功した。

(4) 理論的な検討によって得られたアンテナ理論におけるもう 1 つの洞察は、アンテナの基本関係式についてのものである。基本関係式を一般の受動的なアンテナに拡張し、受信効率を導入するとともに受信特性と送信特性の関係を整理した。特に、相反でないアンテナについても、受信特性と送信特性それぞれに対応する仮想的な相反アンテナを考えることで、従来のアンテナ理論をそのまま適用可能であることを示した。得られた関係式は次のようなものである。

$$A_{\text{eff,pk}} \Omega_{\text{rx}} = (\eta_{\text{tx}} + \alpha_{A \rightarrow C} \eta_{\text{imp,A}}) \alpha_{C \rightarrow R} \lambda^2$$

この場合、受信効率は次式で定義される。

$$\eta_{\text{rx}} := (\eta_{\text{tx}} + \alpha_{A \rightarrow C} \eta_{\text{imp,A}}) \alpha_{C \rightarrow R}$$

より一般に、受動的なアンテナに対してつぎのように受信効率が定義される。

$$\eta_{\text{rx}} := \frac{A_{\text{eff,pk}} \Omega_{\text{rx}}}{\lambda^2}$$

アンテナに対して、送信アンテナ、受信アンテナ、送信アンテナの相反共役受信アンテナ、受信アンテナの相反共役送信アンテナを考えることができる。これは図5のようにまとめられる。

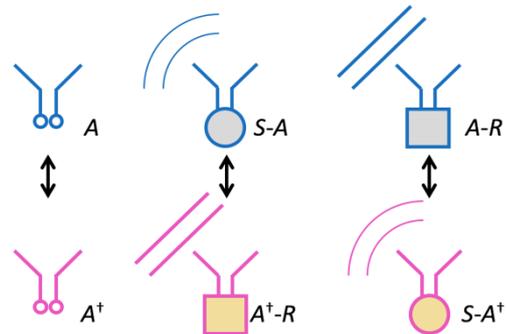


図 5: 送信アンテナと受信アンテナの相反共役

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Makoto Nagai & Hiroaki Imada, "Transmission and Reception Properties of Non-reciprocal Antennas", IEEE Antennas and Propagation (EUCAP), 査読有, 2017, 2988-2992, DOI:10.23919/EuCAP.2017.7928252

[学会発表] (計 6 件)

- ① 永井 誠、今田 大皓、一般のアンテナにおける実効開口面積と開口能率について、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学 (神戸市)
- ② 今田 大皓、永井 誠、収差と開口能率の関係、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学 (神戸市)
- ③ 永井 誠、今田 大皓、ビーム結合と開口能率の再定式化、第 16 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2016 年 3 月 8 日、電気通信大学 (調布市)
- ④ 今田 大皓、永井 誠、収差と開口能率の解析的な関係とその応用、第 16 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2016 年 3 月 8 日、電気通信大学 (調布市)
- ⑤ 永井 誠、今田 大皓、相反とは限らないアンテナの送受信特性の定式化、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 14 日、愛媛大学 (松山市)

- ⑥ 永井 誠、今田 大皓、相反とは限らないアンテナの送受信特性の輻射整合、第17回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップおよび第3回理研NICT合同テラヘルツワークショップ、2017年2月27日、情報通信研究機構（小金井市）

〔その他〕

ホームページ等

<http://aobs.frsc.tsukuba.ac.jp/~nagai/projects/pafp.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井 誠 (NAGAI, Makoto)

筑波大学・数理物質系・研究員

研究者番号：50522877

(4) 研究協力者

今田 大皓 (IMADA, Hiroaki)

筑波大学・数理物質科学研究科・学振特別研究員