

氏名 政井 崇帆

学位(専攻分野) 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第 2477 号

学位授与の日付 2024 年 3 月 22 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 A Study on the Design of Receiver Optics and Waveguide
Components Towards High-Performance (Sub)Millimeter
Wave Multibeam Receivers

論文審査委員 主査 井口 聖
天文科学コース 教授
杉本 正宏
天文科学コース 准教授
林 左絵子
天文科学コース 准教授
Frederick Takayuki Matsuda
宇宙科学コース 助教
前澤 裕之
大阪公立大学 大学院理学研究科 准教授

博士論文の要旨

氏 名 : Takaho Masai

論文題目 : A Study on the Design of Receiver Optics and Waveguide Components Towards High-Performance (Sub)Millimeter Wave Multibeam Receivers

Millimeter/Submillimeter wave radio astronomy is a crucial tool for probing the universe. Observations on key spectral lines can provide invaluable information such as star formation activities and many other characteristics in the form of physical, chemical, and spatial information. The detector of choice at (sub)millimeter wavelengths is heterodyne receivers, especially because they have high-spectral resolution. There has been a big push in recent years to accelerate the scientific output from heterodyne receivers by upgrading key aspects of the detector. One notable upgrade is from a single-beam receiver to a multibeam receiver which has a larger field-of-view (FoV) on the sky. The larger FoV is particularly advantageous for wide-field studies aiming to observe a large area of the sky.

Heterodyne receivers are complex instruments even as single-beam instruments. Multibeam heterodyne receivers are often developed for a large single-dish telescope with sufficient room or for a dedicated cryostat in an antenna.

One unique development plan is that of the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) development roadmap. Here, the replacement of the current single-beam receivers to multibeam receivers has been a highlight as the next mid to long term upgrade. The antennas are designed for single-beam receivers and thus impose a uniquely challenging setting for implementing a multibeam receiver as the antenna was originally meant for single-beam receivers. In this situation, the number of pixels that can be integrated on the receiver will be limited by the antenna itself, and thus only a modest number of pixels may be implemented. It is inevitable to then design the individual pixels to have as high of performance as possible. However, the design of the receiver front-end components; the receiver tertiary optics, feed horns, and waveguide block, have not had sufficient considerations.

In this thesis, several topics concerning the design and integration of multibeam heterodyne receiver front-ends under the setting of replacing a single-beam receiver in a radio telescope are discussed.

One critical aspect of the receiver optics is the effect of aberrations. Aberrations are the errors introduced by an optical system which causes degradation in optical efficiency. For a radio telescope, the effect of aberrations will lower its aperture efficiency. In a multibeam receiver, each pixel is located at a different position in the focal plane of the telescope meaning they all see different amounts of aberrations. A comprehensive understanding of aberrations is crucial towards aiming for high-efficiency receiver optics. This thesis presents the development of software code to rapidly calculate the aperture efficiency affected by aberrations.

This thesis also investigates the detailed design of the receiver tertiary optics to obtain frequency independent designs. Frequency independent design has been well established in single-beam receivers. The expansion of the design to multibeam has not been discussed much. Frequency independent optics come with the very attractive merit of constant aperture efficiency within the frequency band. However, the demerit is more complex optical designs that require more consideration. This thesis looks at the design and analysis of individual pixels in a multibeam receiver and solves the conditions to obtain frequency independent illumination at the sub-reflector utilizing ray tracing and physical optics simulations.

This thesis also looks at the design of re-imaging optics for overcoming the strong constraint introduced by a cryostat and its window. Cryogenically cooled

receivers are put in a cryostat to lower its physical temperature. The cryostat itself imposes strong constraints on the design of the receiver optics. Re-imaging optics can be used to redirect beams to pass through a small aperture such as a cryostat window. Here, the re-imaging optics were used to both redirect receiver beams from a multibeam receiver to pass through a small 35 mm diameter aperture, but also to obtain the frequency independent condition for each receiver beam.

Finally, a novel wideband waveguide-based Magic Tee junction was developed for tackling potential issues for the waveguide block and Local Oscillator distribution circuits. The Magic Tee is a 4-port junction that has exceptional port-to-port isolation, which is a crucial trait for key waveguide components. Here, a wideband Magic Tee was designed to replace the conventional 3-port junctions used in current split-block receivers waveguide blocks.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 政井 崇帆

論文題目 A Study on the Design of Receiver Optics and Waveguide Components Towards High-Performance (Sub)Millimeter Wave Multibeam Receivers

電波望遠鏡ではヘテロダイン方式を受信機システムに採用することにより、周波数(速度)分解能が他波長と比べ非常に高い精度での観測を可能とさせる。しかし、この方法はこれまで導波管コンポーネントや冷却系・光学系構造等の制約により広視野化が困難とされてきた。本研究では、ヘテロダイン方式を採用しつつ、マルチビーム化を実現し、広視野かつ高速度分解能を実現する次世代の受信機システムの開発を目指すものである。

本研究では、マルチビーム・ヘテロダイン方式の受信機システムの実現に向けて、特に、(1)制約条件が厳しい既存の単一ビーム望遠鏡:Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) を対象としたマルチビーム受信機光学系の設計、および(2)マルチビーム化の課題の1つである局部発振信号の高効率・高分離の分配伝送を実現する Magic Tee の開発研究を行った。

本研究でのマルチビーム光学設計においては、光線追跡法と開口能率計算手法を組み合わせ短時間でオフセット光学系の性能・収差の影響を評価する手法を提案、そしてそれを用いて、厳密な周波数独立解を制約条件としたコンパクトなマルチビーム光学系を提案すると共に関連する課題を議論している。まず、マルチビーム光学設計において、ビーム数・光学素子数増加による計算負荷増が1つの課題となり得る。本研究で提案された光線追跡法と開口能率計算手法を組み合わせた手法は、従来、電波天文や電波工学分野で活用されてきた物理光学計算に比べ短時間に計算でき、設計最適化やパラメータ探索等を効率的に行えることから、ビーム数が増えていくであろう将来のマルチビーム光学設計において一般に広く応用されることが期待される。次に、単一ビーム・ヘテロダイン方式で設計された ALMA では、RF 帯域全域すべてで高感度 (スループット 80%以上)を達成する非常に高い設計要求がある。本研究では、開口能率が周波数に対して依存しない周波数独立解を制約条件とした上で、広帯域高感度特性を担保したビーム数が 2 の ALMA マルチビーム受信機の実現可能性を示すことに挑戦し、その可能性を示すことができた。これまでもヘテロダイン方式でのマルチビーム受信機の開発は行われてきたが、周波数独立解で設計された前例はなく、本研究は非常に高難度の光学設計に挑戦したと位置づけて良い。特に設計での独自性は、複数のビームが開口の小さい冷却窓を通過できるようにするために、2つのレンズ光学系からなる再結像光学系を導入し、クライオスタットの 4K ステージの狭い空間に各ビームの鏡が物理的に配置できる工夫を行ったことである。

さらに本研究での Magic Tee 開発研究においては、製造・加工性を考慮しつつ 30-50 GHz 帯において設計・試作し、ポート間分離度-20 dB、反射損失-19 dB を比帯域 50%の広帯域において実現できる見通しを試験実証した。サブミリ波等のさらなる高周波帯への

応用性については引き続き詳細な研究開発が期待されるが、本研究は、導波管による局部発振信号の混合を前提とする受信機構成のマルチビーム化の課題解決へ貢献する成果と言える。

これらの「周波数独立解を制約条件としたマルチビーム光学系設計」および「局部発振信号の高効率・高分離の分配伝送を実現する広帯域 **Magic Tee** 開発研究」に対して、出願者は主体的に取り組み、またその研究成果には上記の通り独自性が含まれることは明らかである。以上の理由により、審査委員会は、本論文が博士学位授与に値すると判断した。