

内 94-54

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

早稲田 64 素子大型アレイ
干渉計による2次元ダイレクト
イメージング観測

申請者

乙部 英一郎

Eiichiro Otobe

物理学及応用物理学専攻
実験天体物理学研究

1994年1月

世界各地に建設されているコリレーター型電波干渉計（Cambridge 5km, MERLIN, VLA, VLBA, Westerbork, 野辺山5素子干渉計、野辺山ヘリオグラフなど）は、空の細かい像を長時間かけて高分解能観測を行うのに適しており電波源の構造（銀河中心核からの relativistic jet やその活動性など）の解明に大きな役割を果たしてきた。その一方で、Cyg.X-3, SS433, LSI+61° 303, Cir.X-1, 電波超新星などのトランジェント電波源のサーベイ観測は継続的には行われていないのが現状である。コリレーター型干渉計で空の広域をサーベイするのは不可能である。また、大型のシングルディッシュでは空に対して1点しか感度を持たないので観測効率が悪い。従って空の広域を効率よくサーベイするには高感度、広視野をモニターできる電波望遠鏡が望まれる。早稲田大型アレイ干渉計は、2.4mのカセグレンアンテナを8×8に等間隔で配列した構造をもつ。観測周波数は10.65GHz（波長2.8cm）、帯域幅は20MHzである。2次元空間FFTプロセッサー（デジタルレンズ）により $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ の視野を分解能 $0.08^\circ \times 0.08^\circ$ 、感度約500mJyで64方向のダイレクトイメージング観測が実現できるのでトランジェント電波源のサーベイには有効な観測装置である。1988年より早稲田大型アレイ干渉計は開発が始まり1993年1月に64素子が受信可能な状態となった。本論文では大型アレイ干渉計の開発とこれまでの観測結果について報告する。以下、章を追って本論文の内容を述べる。

序論では、早稲田空間FFT型干渉計の必要性をその他の電波望遠鏡と比較し述べる。また、本観測装置によるサーベイの天文学に対する貢献について述べる。

第2章では早稲田大型アレイアンテナを構成するアンテナ素子である直径2.4mのカセグレン光学系の設計方法について、さらに月を観測しアンテナの性能を調べた結果について述べる。ここで述べるアンテナ光学系の設計は、主鏡は市販のものを用いたので光学系の開口能率が最大となるようにフィード系および副鏡の設計を行った。開口能率の計算はホーンからの放射電磁界を求めなくてはならない。通常、カセグレンアンテナのフィードとしてコニカルホーンやコルゲートホーンが用いられている。この場合の設計法では、ホーンから放射される電磁放射界をホーンの軸に対称なガウシアンビームと仮定して光学系を決定する手法がよく用いられる。しかし、早稲田大型アレイのカセグレンアンテナでは製作コストを削減するためにフィードとしてピラミダルホーンを用いることにした。このため放射電磁界をガウシアンビームと仮定することができず、ホーンの開口面に分布する電磁界からベクトル型のキルヒホッフ積分により電磁放射界を求める。ピラミダルホーンの設計では開口面のサイズとホーンの軸長を決定する。これらは、ホーンと受信機が直結する構造をとるために電源やローカル信号の分配が容易になるように、また放射電磁界より計算されるアンテナパターンができるだけ軸対称となるように決定する。副鏡での決定すべきパラメーターは2焦点間距離、離心率、開口径である。ホーンと副鏡の位置関係を決めれば、放射電磁界の波面の曲率中心で定義される位相中心と2次焦点の位置を一致させることで幾何学的な計算により2焦点間距離、離心率は求

めることができる。開口径については、ホーンと副鏡の位置をパラメーターとして動かしながら、開口径が波長の10倍程度で開口能率が最大となるような光学系求めることで決定する。この計算では、計算機の負担を軽減させるためにカセグレンアンテナと光学的に等価なパラボラアンテナに対して行った。また、設計したカセグレンアンテナの放射電磁界、アンテナパターンを計算した。アンテナパターンの測定は、デジタルレンズをスルー mode で利用することで行うことができる。太陽、月を観測して64素子のアンテナパターンの測定及び解析結果について述べる。

第3章では、空間FFT型干渉計のイメージング原理について述べる。従来のコリレーター型の干渉計は、u-v平面上で相関をとって得られた visibility が brightness とフーリエ変換で結びついていることをを利用してイメージングを行う。この方法は、長時間かけてできるだけたくさんのフーリエ成分をとることにより電波源の細かいイメージを得るのに向いている。一方、空間FFT干渉計では、リアルタイムで電波源の像を合成するダイレクトイメージングが可能である。等間隔にアンテナを配列したアレイ面に分布する電波は、多方向の電波源からの電波の重ねあわせで表せる。電波の到來方向に応じてアレイ面に分布する電波の空間周波数は異なる。つまり、リアルスペースでの電波の振幅とモーメンタムスペースでの電波の振幅はフーリエ変換で結ばれている。このことを利用しアレイ面に分布する電波を同時刻にサンプルしFFT演算（Nポイント）を行った後、電力積分を行うことによりN方向の天空のbrightnessを同時に得ることが可能となる。以上に述べたイメージング原理の議論では、電波源からの電波は単色光としての取り扱いで十分である。しかし、電波源が天体の様に微弱な場合、SNを向上させるために帯域幅を持たせて観測を行う。早稲田大型アレイのようにエレベーション方向にディレイが生じるような場合、色収差が問題となり準单色光としての取り扱いが必要となる。天頂から大きく離れた電波源を観測する際には、コヒーレンシーが減少しビーム強度が減少する。そこで本章では、ビーム強度のエレベーション方向の依存性についても調べた。

第4章では、本観測装置のシステム（デジタル部及びアナログ部）について簡単に述べる。また、観測データからシステムの検出限界を求める。早稲田大型アレイ干渉計は直径2.4mのアンテナを64個もちいているので集光力で單一ディッシュの64倍の能力をもつ。ポイントソースTau.Aをダイレクトイメージングで得られたデータからノイズレベルとピーク値との比をとることでシステムの検出限界を求める。

第5章では、2次元観測位相キャリブレーションについて述べる。ダイレクトイメージング観測を可能にするには、RFからベースバンドまでの伝送系で生じた位相誤差を除去する必要がある。コニカルホーン64個を配列した小型アレイ（2m×2m）で、現在までに開発してきた位相誤差測定法は、トラッキングが可能なアレイについてのみ行われてきた。しかし、大型アレイはトランシットマウントを用いているために、電波源をトラッキングしながらすべての素子の位相を測定するという手

法はとれない。大型アレイでの2次元観測では、64素子の位相誤差を一度に測定するようなアルゴリズムが要求される。一般に2素子間の伝送路に生じた位相誤差は、ポイントソースを2素子干渉計で相関をとって得られたフリンジの位相に含まれる。フリンジから64素子の位相誤差を求めるには、最低でも63組のアンテナ間でフリンジを検出しなくてはならない。そこで、新たに2次元観測用にデジタルレンズをパラレルフリンジ検出器としてプログラミングをして利用する方法を開発した。デジタルレンズは、本来2次元FFTプロセッサーとして開発されたものであるが、FFTのバタフライ演算を行うLSI、CXD2200(SONY)をうまくプログラムすることでパラレルフリンジ検出器としての利用が可能となる。この2次元パラレルフリンジ検出法により大型アレイでのダイレクトイメージング観測が可能となった。また、この章では得られたイメージから位相誤差を測定する方法についても述べる。

第6章ではこの位相キャリブレーション法で得られた2次元観測データーを示す。2次元のダイレクトイメージング観測では、 8×8 の画素のデーターつまり64方向のデーターを同時に得ている。ダイレクトイメージング観測の結果の1例としてTau Aが 8×8 の画素の中を日周運動により通過していく様子を本論文で示す。

第7章では、電波源の強度のキャリブレーションについて述べる。変動電波源のサーベイには観測システムを安定化させた上で電波源の強度を正確に決定しなければならない。ここで、第3章で述べたビーム強度のエレベーション方向の依存性を考慮する必要がある。空間FFT干渉計での電波源強度の測定は、今までにいくつか考え出されてきた。この章では、最小自乗法によるフィッティングにより電波源の強度と赤経、赤緯をポイントソースのレスポンスと観測データーの差の2乗和が最小となる条件で求める方法を紹介する。ただし、観測時にポインティングミスや位相誤差に残留誤差が存在するような場合、ビームがそれらに対応した位相に応じてシフトするので、新たに赤経、赤緯方向に対応した位相勾配をパラメーターとして加えビームを視野内で振る必要がある。電波強度のすでにわかっているような電波源(Tau.A, Cas.A, Cyg.A, Vir.A)を観測し、フィッティングにより強度の比較及び視野内の赤経、赤緯の絶対量を決定できることがわかった。2秒積分でサーベイを行なうと1日のデーター量は10Mbyteになる。最小自乗法によるフィッティングを行なうことでポイントソースをこれらのデーターの中から精度よく見つけだすことが可能となるであろう。

第8章では、以上の議論の結論について述べる。10GHzでの全天サーベイはなされず、本観測装置は赤緯 -10° ～ 90° の広域にわたりダイレクトイメージングによるサーベイが500mJyの感度で実行が可能な世界で唯一の電波望遠鏡である。

以上