

NANTEN2 サブミリ波望遠鏡 230 GHz 帯受信機の概要

古賀 真沙子 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

我々の研究室では、南米チリ・アタカマ高地 (標高 4860 m) に設置された口径 4 m のサブミリ波望遠鏡「NANTEN2」を用いて宇宙電波の観測を行っている。NANTEN2 電波望遠鏡では、2013 年度より 230 GHz 帯受信機を搭載し、一酸化炭素分子の回転遷移輝線 $\text{CO}(J=2-1)$ を用いて多数のプロジェクトの観測を行っている。天体からの電波はきわめて微弱であるため、受信機自体の雑音を押さえた上で信号を増幅することが重要である。しかし我々が観測する 230 GHz 帯の高周波電波を直接増幅できる低雑音増幅器はまだ実用化されていない。そのため NANTEN2 受信機では、初段部分を 4 K まで冷却し、超伝導ミクサーを使ったヘテロダイン方式 (周波数変換方法の一種) を用いて信号周波数を下げてから増幅を行うことで、受信機雑音温度 30–50 K の低雑音を目指している。また、安定した望遠鏡運用のためには、受信機を望遠鏡に搭載する前に、実験室でその性能やノイズ、長時間安定性の調査等を行って最良の状態を知っておく必要がある。2015 年度シーズン立ち上げ前の実験室評価では、Hot/Cold 法を用いた受信機雑音温度の正確な測定を重点的に行った。Hot/Cold 法は、受信機に常温と液体窒素温度の擬似黒体を見せたときのそれぞれの出力パワーから受信機雑音温度を見積もる評価法で、受信機の性能を定量化する際にしばしば用いられる。この方法を用いて測定した 2015 年シーズンの 230 GHz 受信機の受信機雑音温度は、観測周波数の 226 GHz において 30–40 K となり、当初の目標を達成することが出来た。この結果は望遠鏡に搭載後にも再現したことが確認されており、実験室での事前評価の重要性を再確認することが出来た。本ポスター講演では現在搭載されている 230 GHz 帯受信機の受信システムの概要および、実験室での受信機性能評価の詳細を紹介する。

1 イントロダクション

NANTEN2 電波望遠鏡では、現在 230 GHz 帯超伝導受信機を用いた分子雲観測を行っている。天体からの微弱な電波を低雑音で増幅するため、NANTEN2 受信機では初段部分を 4 K まで冷却し、超伝導ミクサーを使って周波数を下げて扱いやすくしてから増幅するという手段をとっている。2015 年度シーズン用の受信機は、立ち上げ前の実験室での性能評価において受信機雑音温度 30–40 K を達成していることを確認した後、望遠鏡に搭載された。以下では NANTEN2 電波望遠鏡の紹介をした後、現在搭載されている 230 GHz 帯受信機システムの概要と実験室での受信機性能評価の詳細を報告する。

2 NANTEN2 電波望遠鏡の概要

NANTEN2 電波望遠鏡は南米チリにある名古屋大学所有のミリ波/サブミリ波望遠鏡であり、分子雲の分布や物理状態を広域かつ高分解能で観測することができる。



図 1: NANTEN2 電波望遠鏡

230 GHz 帯の電波観測における NANTEN2 電波望遠鏡のスペックは以下のとおりである。

- 観測サイト：南米チリ・アタカマ高地 (標高 4860 m)
- 口径：4 m
- 観測周波数：230 GHz
- 速度帯域：-650 km/s +650 km/s
- 速度分解能：0.08 km/s
- ビームサイズ：約 90 ”
- 望遠鏡保護ドーム・電波透過幕完備

また、NANTEN2 望遠鏡にはリモート制御システムが搭載されており、名古屋からのリモート観測が可能である。

3 現在進行している観測プロジェクト

NANTEN2 では現在、分子雲衝突による大質量星形成 (CCC)、超新星残骸 (SNR)、小質量星形成、銀河系中心領域他多数の観測プロジェクトが進行している。その他にも大小マゼラン雲や磁気浮上ループ、宇宙ジェットの観測も行われている。

4 230 GHz 帯受信機

NANTEN2 受信機では、天体からの微弱な電波を低雑音で増幅するために、ヘテロダイン方式という周波数変換法を採用している。以下ではヘテロダイン方式の概要と NANTEN2 受信機システムおよびその評価方法について述べる。

4.1 ヘテロダイン方式

ヘテロダイン方式は周波数変換方法の一種であり、周波数 f_{RF} の受信電波と、局部発振器 (LO 源) から発振させた周波数 f_{LO} の信号をミクサー (周波数混合器) で混合させ、うなりとして差周波 $|f_{RF} - f_{LO}|$ を取り出すことで、周波数を下げることが出来る。

$$f_{output} = |f_{RF} - f_{LO}| \quad (1)$$

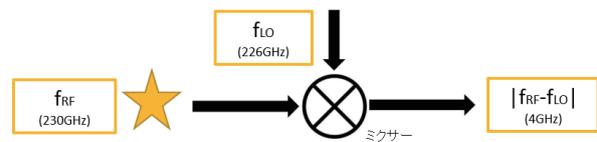


図 2: ヘテロダイン方式の模式図

以下にヘテロダイン方式の模式図を示す。

この方法を用いることで 200 GHz を超える天体からの高周波電波をより低い周波数に落とし、低雑音で増幅することが可能になる。

4.2 IF 系

ヘテロダイン方式を用いて扱いやすい周波数に変換された信号は、IF (Intermediate frequency) 系と呼ばれるシステムを通じてさらに周波数変換・増幅され、最終的にはデジタル分光計でフーリエ変換されて周波数スペクトルとして検出できる。以下に NANTEN2 受信機の IF 系を模式的に表したブロック図を示す。

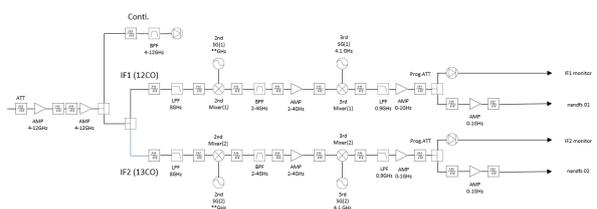


図 3: IF 系の模式図

NANTEN2 ではヘテロダイン変換後の IF 系で周波数を 2 段階に分けて落とし、バンドパスフィルターや増幅器を使って必要な周波数を切り出している。さらに可変減衰器を使って最適な信号パワーに調整した後、分光計でフーリエ変換して周波数スペクトルを検出している。また、この IF 系を 2 系統に分けることにより、2 種類の輝線、 $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ (230 GHz) と $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ (220 GHz) を同時観測している。

4.3 受信機雑音測定方法

NANTEN2 受信機では、Y-factor 法により受信機雑音温度 (受信機自体が出す電磁波や電気信号による

雑音を黒体温度に換算したものを測定することで受信機雑音を定量化する方法をとっている。以下ではその詳細を示す。

4.3.1 Y-factor 法

受信機雑音温度 T_{rx} は、常温 $T(\text{hot})$ の黒体で受信機の入り口をふさいだときの出力 $P(\text{hot})$ 液体窒素温度 $T(\text{cold})$ の黒体で受信機の入り口をふさいだときの出力 $P(\text{cold})$ の比 $Y = P(\text{hot})/P(\text{cold})$ から求まる。このような測定方法を「Y-factor 法」といい、このときの比 Y のことを「Y-factor」とよぶ。受信機雑音温度 T_{rx} と Y の関係は、

$$T_{rx} = \frac{T(\text{hot}) - T(\text{cold}) Y}{Y - 1} \quad (2)$$

で表される。したがってこの Y の値を測定できれば受信機雑音温度 T_{rx} を導くことが出来る。

4.4 実験室での評価結果

実験室において 2015 年度シーズン NANTEN2 搭載予定の 230GHz 帯受信機の性能評価および長時間安定性調査を行った。以下にその評価結果を示す。

4.4.1 性能評価

受信機性能評価は、超伝導素子、冷却アンプなどの受信機雑音への寄与が大きいコンポーネントは実際に観測で使うものを用い、IF 系を含むその他のコンポーネントは実験室にあるもので代用した。

評価方法 評価は局部発振機の信号周波数を観測で用いる 226 GHz に設定し、Y-factor 法を用いて行った。具体的には受信機用超伝導素子にかかる電圧および電流を少しずつ変化させ、最も受信機雑音温度が低い電流・電圧値を探していく方法である。電流 → 電圧の順で変化させ、最後に最適電圧値に固定してもう一度電流値を変化させ、最も Y-factor が高く、かつ IF 系通過後の出力が安定している電流・電圧値を決定した。

評価結果 Y-factor 測定の結果、超伝導素子にかかる電圧が 4.6 mV、流れる電流値が 144.9 μA のとき、当初の目標である受信機雑音温度 30–50 K を満たす 32.9 K を達成していることを確認した。以下に電流・電圧値の変化に対する受信機雑音温度の変化を表した図および表を示す。

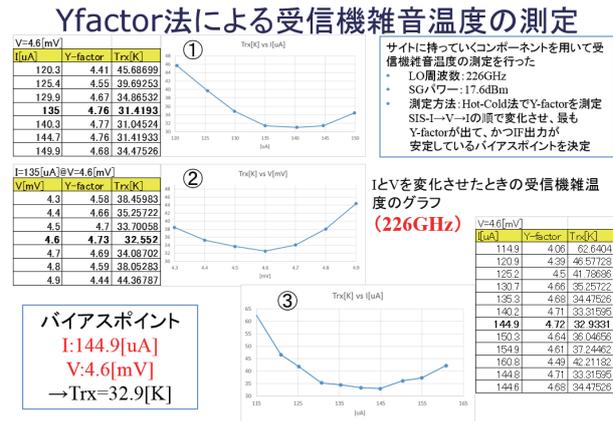


図 4: 電流・電圧値に対する受信機雑音温度の変化

また、実際に観測サイトで同様の測定を行うことで、この実験室での評価結果の再現が確認されている。

4.4.2 安定性評価

評価方法 電源ケーブルや各種コネクタ類をアルミホイルで包み、グラウンドを統一してノイズ対策を行ったのち、受信機雑音が最も低かった電流・電圧値にチューニングしてIF系通過後の出力をモニターした。データ取得時間およびインターバルは以下のとおり。

- データ取得インターバル: 1 秒
- データ取得時間: 20 分

評価結果 経過時間に対する IF 出力の変動は以下の図のようになった。

何度か取得したが、変動はおおむね 0.1 dBm 程度で推移しており、時々急激にパワーが 0.5 dBm 程度上昇・下降するときがあることがわかった。この急激なパワー変動の原因調査および対策の

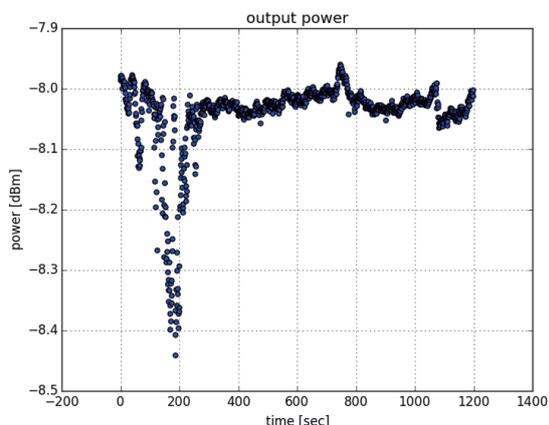


図 5: 経過時間に対する IF 出力の変動

検討は時間の都合上行うことが出来なかった。望遠鏡に搭載後、あらかじめ強度のわかっているキャリブレーション用の天体を長時間連続観測することにより、より詳細かつ観測に直結した受信機の安定性を調査し、観測への影響を考察する。

4.5 NANTEN2 受信機の今後

NANTEN2 では現在、全天の 70% に渡って分子雲をサーベイする超広域 CO 観測 (NASCO: NAten Super CO survey) を計画している。この NASCO を効率良く進めるため、現在は 115 GHz 帯の両偏波受信機を開発している。この受信機では両偏波の受信に加え IF 系の広帯域化も計画しており、成功すれば ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 C^{18}O の 3 輝線を同時観測することが可能となり、また観測効率も格段に上昇する。新受信機搭載により、分子雲のより詳細な科学観測の実現が期待される。

Reference

宇宙の観測 (2) 電波天文学 (シリーズ現代の天文学),
中井直正, 福井康雄, 坪井昌人, 他, 2009, 日本評論社