

卒業論文

茨城 32m 電波望遠鏡 22GHz 帯
アラン分散測定と評価

2013 年度
(平成 25 年度)

茨城大学理学部理学科

学際理学コース

10S6020H

千葉 元貴

概要

茨城 32m 電波望遠鏡とは、茨城県高萩市と日立市に跨る場所に位置する口径 32m の 2 基(高萩アンテナ、日立アンテナ)の電波望遠鏡を指す。本電波望遠鏡は他局の電波望遠鏡と連携した JVN(Japanese VLBI Network)の観測に参加しているほか、単一鏡観測として天体のメーザー源のモニター観測やサーベイ観測を行っている。また、高萩アンテナ・日立アンテナによる二素子干渉計観測の実現に向けた研究も行われている。

電波望遠鏡は、大きく分けて天体からの電波を集めるパラボラアンテナ、電波の増幅や周波数変換を行う受信機、電波強度に比例した電圧を出力する検波器又は周波数ごとの電波の強さを出力する分光計、データの取得や処理を行う計算機によって構成されている。我々は 2013 年 10 月に新たに茨城 32m 電波望遠鏡用 22GHz 帯冷却受信機 2 号機を組み立てた。2014 年 1 月からこの受信機を日立アンテナに搭載し性能測定を行っている。本論文では 22GHz 帯冷却受信機 2 号機単体の雑音温度測定、2 号機を搭載した日立アンテナのシステム雑音温度測定、1 号機を搭載した高萩アンテナ及び 2 号機を搭載した日立アンテナのアラン分散測定の結果について述べる。

受信機単体の雑音温度測定では、30K 以下という値が得られた。これは既に観測に用いられている 1 号機の雑音温度より概ね低い値であり、2 号機の日立アンテナへの搭載は問題ないと判断できた。

システム雑音温度測定では、52K 程度(冬季、晴天、大気込み、アンテナ天頂向き)という結果が得られた。他の JVN 参加局のシステム雑音温度は 100K 程度であるため、比較すると非常に低い値が得られた。高感度なシステムが完成したといえる。

アラン分散測定では、観測システムの安定時間を評価した。分光計 1ch の絶対値の出力の安定時間と 2ch 間の相対値の出力の安定時間を求めた。2ch 間の相対値の出力安定時間は単一鏡分光観測の際の ON 点と OFF 点の積分時間の指標となる。22GHz 帯冷却受信機 1 号機を搭載した高萩アンテナの測定では絶対値で 30 秒、相対値で 70 秒(晴天、アンテナ仰角 90 度)という安定時間が得られた。22GHz 帯冷却受信機 2 号機を搭載した日立アンテナの測定では絶対値で 50 秒相対値で 70 秒(晴天、アンテナ仰角 85 度)という安定時間が得られた。また、日立アンテナにおける複数回の測定の比較により、低仰角、悪天候時は安定時間が短くなる傾向が得られた。

目次

第1章	序論	
1.1	電波天文学	1
1.2	電波望遠鏡の構成	1
1.2.1	受信機システム	1
1.2.2	電波分光計	1
1.3	茨城 32m 電波望遠鏡	2
1.4	22GHz 帯電波天文観測	3
第2章	茨城 32m 電波望遠鏡 22GHz 帯受信機システム	4
2.1	22GHz 帯受信機システムの構成	4
2.2	冷却デュワー	5
第3章	受信機システムの性能評価	6
3.1	雑音温度	6
3.2	S/N 比	6
3.3	Y-factor 法	7
3.4	Y-factor 法による受信機雑音温度測定	8
3.5	システム雑音温度	10
3.6	R-sky 法	12
3.7	R-sky 法によるシステム雑音温度の測定	12
第4章	観測システムのアラン分散測定	15
4.1	分光計 K5/VSSP32	15
4.2	ON-OFF 観測	15
4.3	観測システムの時間依存性	15
4.3.1	アラン分散	16
4.3.2	分光アラン分散	16
4.4	高萩アンテナにおけるアラン分散測定	18
4.5	日立アンテナにおける分光アラン分散測定	21
第5章	まとめ	25

第1章 序論

1.1 電波天文学

電磁波は波長の長さによって γ 線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、電波と分類されている。その中で電波は最も長い波長帯に分類されている。電波による観測では、他の波長帯では観測できないシンクロトロン放射や中性水素原子、極低温の分子ガスの観測が可能である。特に、極低温の星間ガスの観測は星の形成過程を調べるために必要である。また、電波は波長が長いことからガス中の大量の星間微粒子による吸収を受けない。複数の離れた電波望遠鏡で電波を干渉させて観測を行うこともできる。この観測方法では高い角分解能を得ることができる。日本でも、日本各地の電波望遠鏡を用いた VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 観測が行われている。

1.2 電波望遠鏡の構成

電波天文学の観測に用いられる電波望遠鏡は、天体からの電波を集めるパラボラアンテナ、電波の増幅や周波数変換を行う受信機システム、電波を周波数で選別し強度を出力する分光器又は電波の強度に比例した電圧出力を行う検波器、データ処理や機器制御を行う計算機によって構成されている。望遠鏡の装置の前端に位置する受信機システムはフロントエンド、後端に位置する分光器、検波器はバックエンドと呼ばれる。連続波観測の場合は検波器が用いられ、分光観測の場合は分光器が用いられる。

1.2.1 受信機システム

天体からの高い周波数で微弱な強度の電波を取り扱いやすい周波数と強度の電氣的な信号に変換する働きをもつ。微弱な信号を取り扱うため、低雑音化することが必要である。茨城 32m 電波望遠鏡の 22GHz 帯受信機システムの詳細は 2 章で述べる。

1.2.2 電波分光計

分子輝線スペクトルなどの天体の出す線スペクトルを検出するために受信した信号を周波数方向に分解して検出する装置を電波分光計(分光器)という。分光計の性能を表す指標となるものが周波数分解能と周波数帯域幅である。周波数分解能は受信した信号を周波数方向にどれだけ細かく分解できるかを表し、周波数帯域幅は一度に分解できる周波数の範囲を表す。

1.3 茨城 32m 電波望遠鏡

茨城 32m 電波望遠鏡とは、茨城県の高萩市と日立市に跨る場所に位置する 2 基の口径 32m の電波望遠鏡を指す。高萩市側に位置する望遠鏡は高萩アンテナ、日立市側に位置する望遠鏡は日立アンテナと呼ばれている。元は KDDI 株式会社が所有していた衛星通信用のアンテナであった。衛星通信アンテナとしての運用終了後、平成 21 年に国立天文台に譲渡され電波望遠鏡に改造された。現在は茨城大学宇宙科学教育研究センターを中心に運用されている。回転放物面の主反射鏡に回転双曲面の副反射鏡を組み合わせたカセグレン型のパラボラアンテナである。受信周波数は 6GHz 帯、8GHz 帯、22GHz 帯である。現在、茨城 32m 電波望遠鏡では JVN(Japanese VLBI Network)の観測に参加している他、メーザー源のモニター観測やサーベイ観測を単一鏡で行っている。高萩局、日立局の 2 基による二素子干渉計観測を目指した研究も進められている。



図 1.1: 高萩局と日立局



図 1.2: 日立局

1.4 22GHz 帯電波天文観測

22GHz 帯で観測可能な対称としてアンモニア分子輝線、水メーザーの2つが挙げられる。それぞれ天体現象の解明のために重要な意義をもつ。

(1) アンモニア分子反転遷移輝線

$(J,K)=(1,1)-(1,1):23.694506\text{GHz}, (2,2)-(2,2):23.722634\text{GHz}, (3,3)-(3,3):23.870130\text{GHz}$
 $(4,4)-(4,4):24.139417\text{GHz}, (5,5)-(5,5):24.532989\text{GHz}, (6,6)-(6,6):25.056025\text{GHz}$

アンモニア分子輝線の強度比較によって、分子雲の温度や密度、アンモニア分子の量といった物理量を推定することができる。ドップラー効果を用いて分子雲の視線方向の運動を測定できる。分子雲の進化や星形成の起こるプロセスの解明をするために重要な情報を得ることができる。

(2) 水メーザー

$J_K-1K_1=6_{16}-5_{23}:22.235080\text{GHz}.$

水メーザーは大質量星形成領域中で多く検出されている。ドップラー効果を用いて分子雲の視線方向の運動を測定できる。分子雲の進化や星形成の起こるプロセスの解明をするために重要な情報を得ることができる。また、活動的銀河中心核では非常に強い水メーザーが検出される。メーザー源の位置と視線速度から中心核に存在すると考えられている巨大ブラックホールの質量が推定できる。

第2章 茨城 32m 電波望遠鏡 22GHz 帯受信機システム

茨城 32m 電波望遠鏡用 22GHz 帯受信機の 1 号機は既に高萩アンテナに搭載され、観測に使用されている。今回、新たに 22GHz 帯受信機の 2 号機を組み立て、日立アンテナにおいて 22GHz 帯受信機システムを構成した。

2.1 22GHz 帯受信機システムの構成

電波望遠鏡のアンテナによって集められた電波はビーム伝送系を通じて冷却デューワー内へ導かれる。冷却デューワー内で電波は、断熱導波管、円角変換導波管を通じて円偏波分離器へ導かれる。円偏波分離器によって左旋円偏波(LHCP)、右旋円偏波(RHCP)に分けられ、低雑音増幅器で増幅される。その後、電気的な信号として同軸ケーブルを通じて IF 系へ導かれる。断熱導波管はデューワー外からデューワー内への熱の流入を防ぐために入力部分へ搭載されている。円角変換導波管は、円型の断熱導波管と方型の円偏波分離器を接続するために搭載されている。

IF 系では電気的な信号の周波数変換(ダウンコンバート)や周波数の選択、増幅、可変減衰器によるレベル調整が行われバックエンドへと信号が送られる。天体からの電波と信号発生器(SG:Signal Generator)で発生させた電波の差周波数成分をとって低い周波数にダウンコンバートしている。

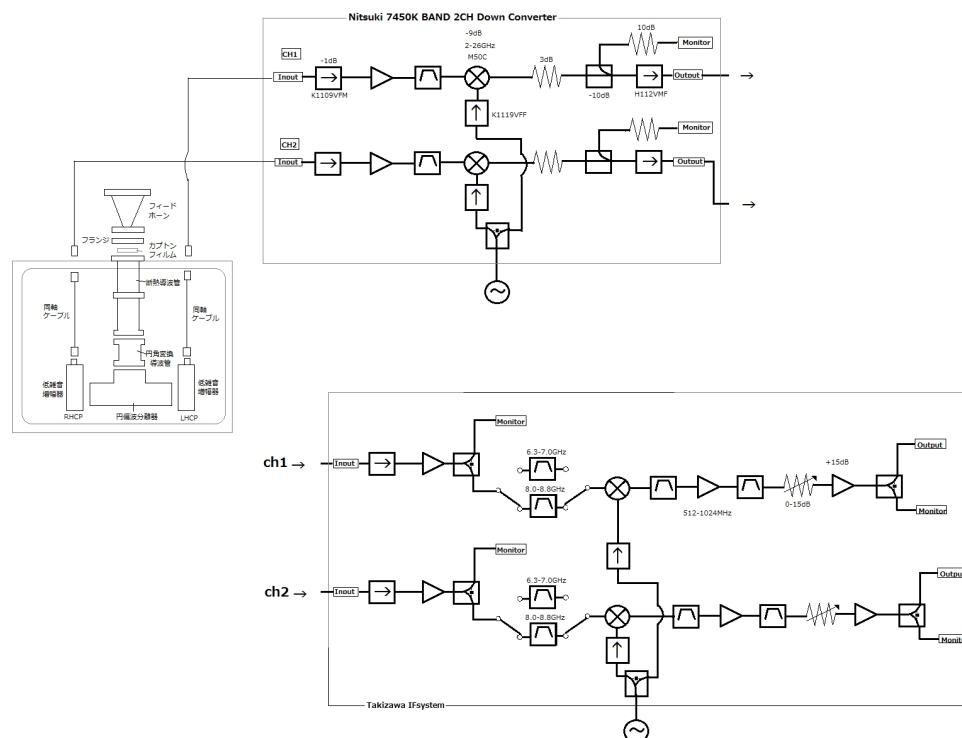


図 2.1: 日立局 22GHz 帯受信機システムのブロックダイアグラム

Takizawa IFsystem とは滝沢氏が開発した IF 系(2011 滝沢 修士論文 参照)。



図 2.2 ブロックダイアグラムにおける記号の説明

2.2 冷却デューワー

冷却デューワー内には、断熱導波管、円角変換導波管、円偏波分離器(ポーラライザー)、低雑音増幅器(LNA, Low Noise Amplifier)、同軸ケーブルが搭載されている。

冷却デューワー内は低雑音化のため、約 11K に冷却されている。また、デューワー内は約 1×10^{-8} Torr の高真空状態となっている。温度勾配を緩やかにし、外気の結露を防ぐためデューワー内はデューワーと 80K シールドの二重構造となっている。また、80K シールド内には 20K ステージが設けられている。20K ステージは冷凍機によって直接冷却されている。特に低雑音化が必要な円偏波分離器、低雑音増幅器、同軸ケーブルは銅製の熱アンカーを通して 20K ステージと物理的に接触させている。

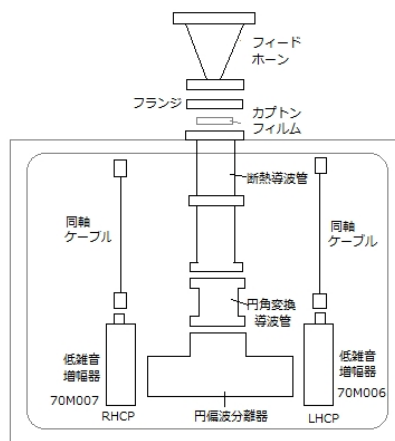


図 2.3:22GHz 帯 2 号機冷却デューワー概略図

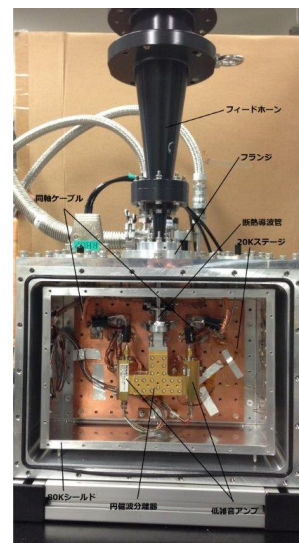


図 2.4:22GHz 帯 2 号機冷却デューワー内部

第3章 受信機システムの性能評価

天体から出された電波は、電波望遠鏡のバックエンドに導かれるまでに、大気やアンテナ、受信機起源の雑音の影響を受ける。雑音の大きさは雑音温度によって定量的に表される。受信機単体の雑音は受信機雑音温度、大気放射やアンテナ、受信機による雑音を全て含めたものをシステム雑音温度という。

3.1 雑音温度

雑音の大きさを定量的に表すために雑音温度を導入する。雑音温度は絶対温度(単位はケルビン)で表される。増幅率 G の増幅器に信号電力 S_i を入力したときに S_0 の出力電力が得られたとする。 S_0 には雑音電力 N も付加され、 $S_0 = GS_i + N$, である。この N は受信機内部で発生したものであるが、「雑音 0 の増幅器の入力端から入力された」とする。すなわち S_i の他に $N_{eq} = N/G$, が入力されたと仮定する。このとき入力端でみた雑音を入力換算雑音と呼ぶ。ナイキストの式から $N/G = kT_n B$, が得られる。したがって、以下の T_n が得られる。 T_n を入力換算雑音温度という。

$$T_n = \frac{N_{eq}}{kB}. \quad (3.1)$$

k はボルツマン定数、 B は受信周波数幅である。

3.2 S/N 比

電波望遠鏡の感度の指標となるものに S/N 比(信号雑音比)がある。天体から受信した信号電力が得られた情報量 S となる。同時に受信した雑音電力を N とすると、受信した情報の質は S/N で表される。天体から受信する信号の電力量は観測時間 t に比例して増える。雑音の電力量は観測時間 t の平方根に比例して増える。この観測における S/N は観測時間 t の平方根に比例して改善される。 S/N の関係を式で表すと以下の通りになる。

$$\Delta T = K_s \times \frac{T_{sys}}{\sqrt{Bt}}. \quad (3.2)$$

ΔT はデータの期待される標準偏差 1σ 、 T_{sys} はシステム雑音温度、 B は受信周波数幅、 t は観測時間、 K_s は受信方式による係数である。一般的には $5\Delta T$ 以上の強度の信号が受かったときに信号が有意に検出されたと考える。

3.3 Y-factor 法

Y-factor 法とは異なる温度をもつ2つの電波吸収体で受信機のフィードホーンを覆った際の出力比によって受信機雑音温度 T_{RX} [K] を測定する方法である。通常は常温状態の電波吸収体と液体窒素(77K)に浸した状態の電波吸収体を用いる。

常温の電波吸収体を用いた際の出力パワーを $P(amb)$ [W]、液体窒素に浸した電波吸収体を用いた際の出力パワーを $P(77)$ [W] とする。受信機の増幅率を G 、ボルツマン定数を k 、受信周波数幅を B とすると $P(amb)$ 、 $P(77)$ は以下のように得られる。

$$P(amb) = GkB(T_{RX} + T_{amb}), \quad (3.3)$$

$$P(77) = GkB(T_{RX} + 77). \quad (3.4)$$

$P(amb)$ と $P(77)$ の出力比 Y を求める。

$$Y = \frac{P(amb)}{P(77)} = \frac{T_{RX} + T_{amb}}{T_{RX} + 77}. \quad (3.5)$$

上式より受信機雑音温度 T_{RX} は以下のように得られる。

$$T_{RX} = \frac{T_{amb} - 77Y}{Y - 1}. \quad (3.6)$$

今まで出力 $P(amb)$ 、 $P(77)$ の単位は[W]を用いて表した。しかし、本測定で出力を表示するパワーメーターは[dBm]単位表示である。式(3.6)を本測定に用いるためには[W]換算の出力比 Y を[dBm]換算の出力比に変更しなければならない。dBm は 1mW を基準とした電力の単位である。ある出力 P_{out} [W]の単位を[W]から[dBm]に変換するためには以下の式を用いる。

$$P_{out} [dBm] = 10 \log \left(\frac{P_{out} [W]}{1[mW]} \right). \quad (3.7)$$

$P(amb)$ [dBm] と $P(77)$ [dBm] の出力比を Y_{dB} とおく。

$$Y_{dB} = P(amb)[dBm] - P(77)[dBm], \quad (3.8)$$

Y と Y_{dB} の関係式は式(3.7)より以下のように得られる。

$$Y = 10^{\frac{Y_{dB}}{10}}. \quad (3.9)$$

式(3.6)と式(3.9)より Y_{dB} を用いた受信機雑音温度 T_{RX} の式が得られる。

$$T_{RX} = \frac{T_{amb} - 77 \times 10^{\frac{Y_{dB}}{10}}}{10^{\frac{Y_{dB}}{10}} - 1}. \quad (3.10)$$

3.4 Y-factor 法による受信機雑音温度測定

測定方法

茨城 32m 電波望遠鏡用 22GHz 帯受信機 2 号機単体の雑音温度を測定した。22GHz 帯受信機 2 号機は 2013 年 10 月に組み立てを行い、2014 年 1 月 14 日に日立アンテナに搭載した。今回の測定は搭載前の 2014 年 1 月 10 日に茨城大学実験室で行った。測定方法は常温の電波吸収体(約 300K)と発泡スチロール内で液体窒素に浸した電波吸収体(約 77K)を用いた Y-factor 法である。受信機のフィードホーン上部を電波吸収体で覆って測定した。冷却デューワー内は約 11K に冷却されている。LHCP,RHCP 両方で測定を行った。受信した 22GHz 帯の電波はダウンコンバータによって 6GHz 帯にダウンコンバートしている。22GHz 帯で観測を行うアンモニア分子輝線(23.694506GHz),水メーザー(22.235080GHz)と同じ周波数帯に対して測定を行った。SG のダウンコンバータの CH(1,2)の切り替えも行ったため、合計 8 通りの方法で受信機雑音温度を測定した。

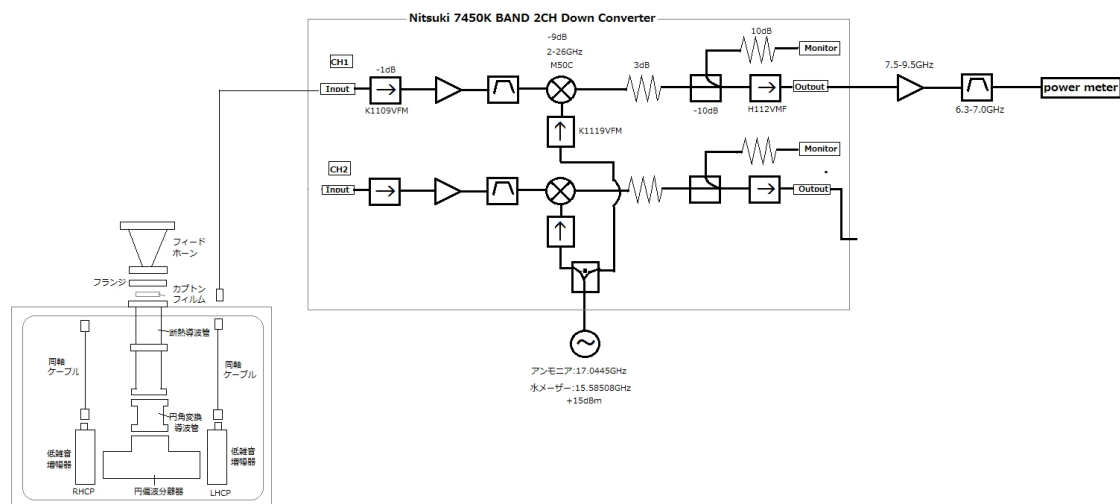


図 3.1:受信機雑音温度測定時のブロックダイアグラム

結果

Y-factor 法による 22GHz 帯受信機 2 号機の受信機雑音温度の測定結果は表 3.1 の通りである。

表 3.1:22GHz 帯受信機 2 号機雑音温度測定結果

測定日:2014 年 1 月 10 日		測定場所:茨城大学実験室			
CH1(ダウンコンバータ)					
水メーザー	LHCP	RHCP	アンモニア	LHCP	RHCP
受信機雑音温度[K]	26.41	26.34	受信機雑音温度[K]	29.39	29.97
CH2(ダウンコンバータ)					
水メーザー	LHCP	RHCP	アンモニア	LHCP	RHCP
受信機雑音温度[K]	24.11	23.17	受信機雑音温度[K]	28.53	28.67

22GHz 帯受信機 2 号機の雑音温度は 30K 以下の値となった。

考察

既に高萩アンテナに搭載されている 22GHz 帯受信機 1 号機の雑音温度を測定した際の結果は表 3.2 の通りである。

表 3.2:22GHz 帯受信機 1 号機雑音温度測定結果

測定日:2013 年 8 月 29 日		測定場所:茨城大学実験室			
CH1(ダウンコンバータ)					
水メーザー	LHCP	RHCP	アンモニア	LHCP	RHCP
受信機雑音温度[K]	37.77	36.69	受信機雑音温度[K]	22.30	38.85

1 号機と 2 号機の受信機雑音温度を比較すると大きな差はなく、アンモニアの LHCP を除いては 2 号機の方が良い結果となった。2 号機の日立アンテナへの搭載は問題ないと判断した。

3.5 システム雑音温度

電波望遠鏡で天体のない空を見たときに得るパワー $P(sky)$ [W] は宇宙背景放射 (約 2.7K) を無視すると次のように得られる。

$$P(sky) = GkB[T_{RX} + (1-\eta)T_{amb} + \eta\{1 - \exp(-\tau \sec Z)\}T_{atm}]. \quad (3.11)$$

ここで η は望遠鏡のフィード効率であり、アンテナ開口面を通過した電波が受信機まで到達する割合を表す。 τ は天頂方向での大気の光学的厚みであり、 Z は天頂からの角度である。望遠鏡が Z の角度を向いているとき天体からの電波が大気を通過する過程で受ける減衰 L を $L = \exp(\tau \sec Z)$ で表す。 T_{amb} [K] は望遠鏡やその周囲の大地の温度。 T_{atm} [K] は電波が通過してくる大気の温度である。

ここで、簡単のため $T_{amb} = T_{atm}$ とすると以下の式が得られる。

$$P(sky) = GkB[T_{RX} + \{1 - \eta \exp(-\tau \sec Z)\}T_{amb}]. \quad (3.12)$$

望遠鏡を天体に向けたときに得るパワー $P(source)$ を考える。受信した天体起源のパワーを温度に換算したアンテナ温度を T_A とする。 $P(source)$ は以下のように得られる。

$$P(source) = GkB[T_{RX} + (1-\eta)T_{amb} + \eta\{1 - \exp(-\tau \sec Z)\}T_{atm} + \eta T_A]. \quad (3.13)$$

$T_{amb} = T_{atm}$ とすると以下の式が得られる。

$$P(source) = GkB[T_{RX} + \{1 - \eta \exp(-\tau \sec Z)\}T_{amb} + \eta T_A]. \quad (3.14)$$

上式で天体起源でないパワーは雑音によるものである。システム雑音温度を T_{sys} [K] とすると以下の式が得られる。

$$P(source) = GkB[T_{sys} + \eta T_A]. \quad (3.15)$$

T_{sys} についての式は以下のように得られる。

$$T_{sys} = \frac{T_{RX} + \{1 - \eta \exp(-\tau \sec Z)\}T_{amb}}{\eta}. \quad (3.16)$$

望遠鏡を大気圏外に出したと仮定する。その時受信した天体起源のパワーを温度に換算したアンテナ温度を T_A^* とする。 T_A と T_A^* の関係は以下の通りである。

$$T_A^* = T_A L = T_A \exp(\tau \sec Z). \quad (3.17)$$

この関係を用いて式(3.14)を変形する。

$$P(source) = GkB[T_{RX} + \{1 - \eta \exp(-\tau \sec Z)\}T_{amb} + \eta T_A^* \exp(-\tau \sec Z)]. \quad (3.18)$$

望遠鏡を大気圏外に出したときのシステム雑音温度 T_{sys}^* は以下のように得られる。

$$T_{\text{sys}}^* = \frac{T_{\text{RX}} + \{1 - \eta \exp(-\tau \sec Z)\} T_{\text{amb}}}{\eta \exp(-\tau \sec Z)}. \quad (3.19)$$

T_{sys} と T_{sys}^* の関係は以下の通りである。

$$\begin{aligned} T_{\text{sys}}^* &= \frac{T_{\text{sys}}}{\exp(-\tau \sec Z)}, \\ &= T_{\text{sys}} L. \end{aligned} \quad (3.20)$$

3.6 R-sky 法

R-sky 法とは、電波望遠鏡で常温の電波吸収体をみたときの出力パワー $P(amb)$ と電波吸収体の温度 T_{amb} 、天体のない空をみたときの出力パワー $P(sky)$ から T_{sys} 、 T_{sys}^* を測定する方法である。

$P(amb)$ と $P(sky)$ の差は、

$$P(amb) - P(sky) = GkB\eta \exp(-\tau \sec Z) T_{amb}, \quad (3.21)$$

$$\eta \exp(-\tau \sec Z) T_{amb} = \frac{P(amb) - P(sky)}{GkB}. \quad (3.22)$$

式(3.12)を変形すると、

$$\frac{P(sky)}{GkB} = T_{RX} + \{1 - \eta \exp(-\tau \sec Z)\} T_{amb}. \quad (3.23)$$

式(3.22)と式(3.23)を式(3.19)に代入する。

$$T_{sys}^* = \frac{P(sky) T_{amb}}{P(amb) - P(sky)}. \quad (3.24)$$

T_{sys} と T_{sys}^* の関係から T_{sys} も得ることができる。

$$T_{sys} = \frac{P(sky) T_{amb}}{P(amb) - P(sky)} \exp(-\tau \sec Z). \quad (3.25)$$

今まで $P(amb)$ と $P(sky)$ の単位には[W]を用いた。本測定では、[dBm]単位表示のパワーメーターを $P(amb)$ と $P(sky)$ の出力表示に用いる。この場合、式(3.24)と式(3.25)を変換した以下の式を用いる。

$$T_{sys}^* = \frac{10^{\frac{P(sky)[dBm]}{10}} T_{amb}}{10^{\frac{P(amb)[dBm]}{10}} - 10^{\frac{P(sky)[dBm]}{10}}}, \quad (3.26)$$

$$T_{sys} = \frac{10^{\frac{P(sky)[dBm]}{10}} T_{amb}}{10^{\frac{P(amb)[dBm]}{10}} - 10^{\frac{P(sky)[dBm]}{10}}} \exp(-\tau \sec Z). \quad (3.27)$$

3.7 R-Sky 法によるシステム雑音温度の測定

測定方法

2014年1月14日に日立局に22GHz帯受信機2号機を搭載した後、日立アンテナのシステム雑音温度を測定した。測定方法はR-Sky法である。 $P(amb)$ を得る際は、電波吸収体で電波望遠鏡の給電ホーン上部を覆った。SGの出力周波数は水メーザー(22.235080GHz)を観測

する際と同じ値に設定した。測定は LHCP, RHCP それぞれで行った。大気の光学的厚み τ は以下のように求めた。

式(3.21)より

$$P(amb) - P(sky) = GkB\eta \exp(-\tau \sec Z) T_{amb},$$

両辺の自然対数をとると以下の式が得られる。

$$\ln(P(amb) - P(sky)) = -\tau \sec Z + \ln(GkB\eta T_{amb}). \quad (3.29)$$

今回の測定では、 $\sec Z = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ ($Z = 5^\circ, 60^\circ, 70.529^\circ, 75.522^\circ, 78.463^\circ, 80.406^\circ, 81.787^\circ, 82.819^\circ, 83.621^\circ, 84.261^\circ$) のそれぞれで $P(sky)$ を得た。得られた $\ln(P(amb) - P(sky))$ をそれぞれ $\sec Z$ に対しグラフにプロットし、最小二乗法によって近似曲線を求め、その傾きを $-\tau$ と求めた。

$$-\tau = \frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.30)$$

この式で x_i は測定したそれぞれの $\sec Z$ 。 y_i は x_i に対して得られた $\ln(P(amb) - P(sky))$ 。

$\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ は x_i 、 y_i の平均値である。

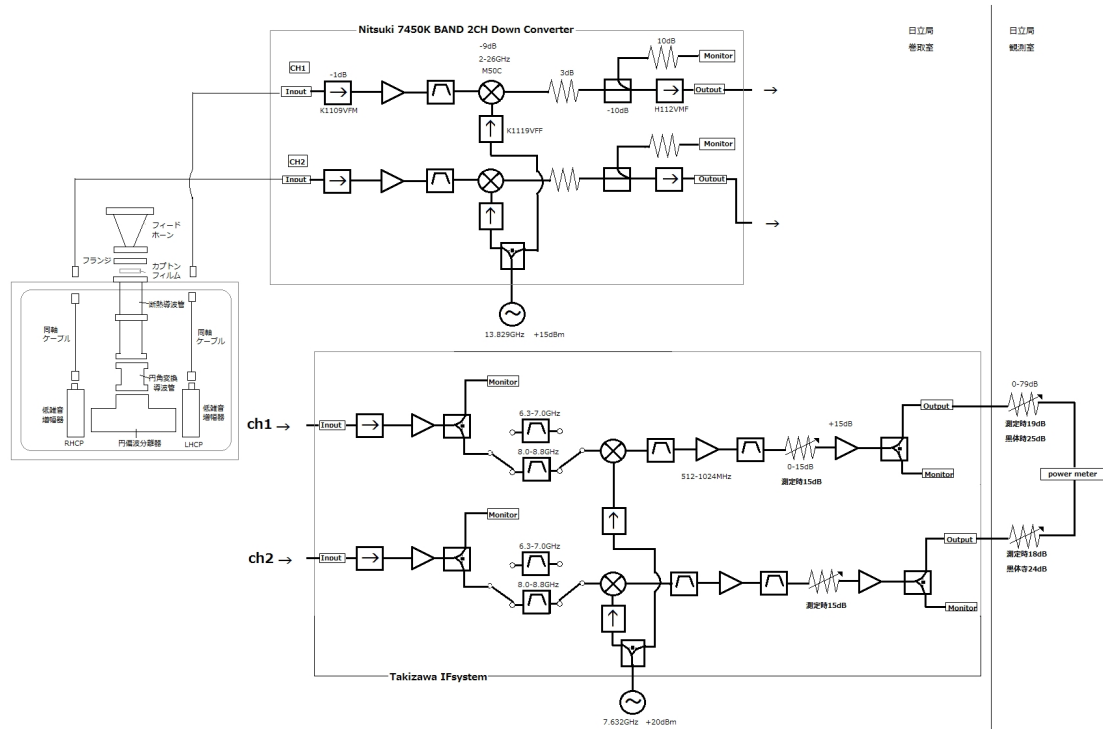


図 3.2: システム雑音温度測定時のブロックダイアグラム

結果

22GHz 帯受信機 2 号機を搭載した日立アンテナのシステム雑音温度測定結果は表 3.3 の通りである。 T_{sys}^* , T_{sys} はアンテナを天頂に向けたときの値である。

表 3.3: 日立アンテナ 22GHz 帯システム雑音温度測定結果

測定日:2014 年 1 月 14 日 使用アンテナ:日立アンテナ 天気:晴れ								
	LHCP	RHCP		LHCP	RHCP		LHCP	RHCP
T_{sys}^* [K]	52.7	51.3	T_{sys} [K]	50.3	48.9	τ	0.048	0.047

22GHz 帯受信機 2 号機を搭載した日立局のシステム雑音温度は約 50[K] という値が得られた。

考察

他の JVN 参加局の 22GHz 帯システム雑音温度は表 3.4 の通りである。表 3.4 のシステム雑音温度の値は大学連携 VLBI ホームページより引用した。他局の 22GHz 帯システム雑音温度は 100K 程度である。システム雑音温度と S/N 比の関係は式(3.2)の通りである。システム雑音の低雑音化は受信感度の向上につながる。システム雑音温度が 1/2 となれば同等の S/N 比を達成するために必要な観測時間は 1/4 となる。

表 3.4: JVN 参加局の 22GHz 帯システム雑音温度

観測局	口径[m]	システム 雑音温度[K]
水沢	20	100
入来	20	100
小笠原	20	100
石垣	20	100
鹿島	34	100
苫小牧	11	100
岐阜	11	100

第4章 観測システムのアラン分散測定

4.1 分光計 K5/VSSP32

茨城 32m 電波望遠鏡では、情報通信研究機構が開発したサンプラー K5/VSSP32 を用いて分光観測を行っている。

K5/VSSP32 は受信した信号をデジタル変換して USB2.0 で LinuxPC へとデータ転送する機能を持ち、PC 上で動作するソフトウェア群を用いて観測を行う。データ処理用ソフトウェア群も用意されており、取得データからパワースペクトルを得ることができる。分光点数は 2048 点と 2097152 点の 2 つから選択できる。

表 4.1: K5/VSSP32 のスペック

サンプリング周波数(MHz)	0.04, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64
内蔵デジタルローパスフィルター(MHz)	2, 4, 8, 16, through
A/D変換器アナログ帯域幅(MHz)	300
A/D量子化ビット数(bit)	1, 2, 4, 8
入力電圧範囲	-1 ~ +1
ユニットあたりのチャンネル数	1, 4
ユニットあたりの最大データレート	256Mbps
標準信号入力	1PPS, 10MHz または 5MHz
PC とのインターフェイス	USB2.0

4.2 ON-OFF 観測

単一鏡においてビーム一つの受信機を搭載している場合は、その光軸上のデータしか取得できない。点状の電波源またはその位置の情報だけに興味がある場合は、その天体(ON 点)とその周辺の天体のない点(OFF 点)を観測し、その差分をとり、大気と望遠鏡起源のオフセット、周波数特性を補正する。

4.3 観測システムの安定度の時間依存性

天体からの電波は微弱で、ノイズとともに観測される。十分な S/N 比を達成するためには、長時間の積分が必要となる。ランダムノイズの標準偏差は積分時間の平方根に反比例して小さくなる。しかし、実際に得られる観測データには地球大気の変動及び受信機や分光計などの観測装置に起因するドリフト(電波出力の時間変動)が含まれる。ドリフトが卓越する時間スケールでは、積分によって S/N 比は必ずしも改善されない。天体を ON-OFF 観測する際はドリフトが卓越する時間よりも短い時間内で ON-OFF の切り替えを行い、ドリフトの影響を取り除く必要がある。安定時間(ドリフトが卓越するまでの時間)が短かけ

ば頻繁な ON-OFF 切り替えが必要となり観測効率が悪くなってしまいます。そのため、安定時間がより長いことが望ましい。

4.3.1 アラン分散

単一鏡観測の観測システムの安定度の時間依存性を評価するためにアラン分散を用いる。アラン分散によって、ランダムノイズに対して系統的なノイズ(ドリフト)がどの程度の時間で卓越してくるかを評価できる。

K5/VSSP32 の出力の各チャンネルの安定時間について評価する。単位時間ごとに連続で N 回サンプリングした K5/VSSP32 出力のデータ列の i 番目のデータを x_i とおく。 x_i ($i=1 \sim N$) を K 個ずつ平均したデータ列 $R_n(K)$ をつくる。

$$R_n(K) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_{nK+i} \quad (4.1)$$

$M = \frac{N}{K} - 1$, として、 $n=0,1,2,\dots,M$, である。 $R_n(K)$ に対して分散 σ_A^2 を以下のように定義する。この分散をアラン分散とよぶ。

$$\sigma_A^2(K) = \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^M \{R_{n-1}(K) - R_n(K)\}^2 \quad (4.2)$$

アラン分散を K に対してプロットしたものをアランプロットという。縦軸、横軸共に対数スケールでプロットする。ランダムノイズが卓越する時間スケールでは積分時間 K に反比例して単調減少するが、系統的なノイズが卓越する時間スケールでは積分時間 K に対して増加に転じる。

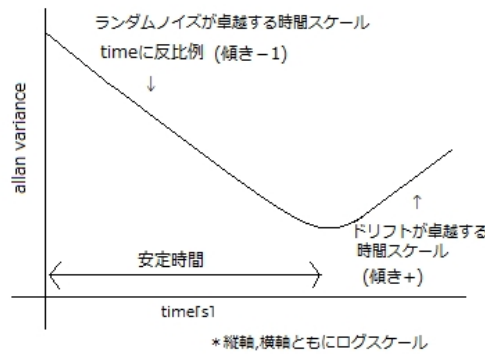


図 4.1: 典型的なアランプロット

4.3.2 分光アラン分散

分光観測では、線スペクトルの形や強度を正確に測定するために線スペクトルのない周波数領域でゼロレベルを決定し、それを差し引く。あるチャンネルの出力強度に変動があっても、興味のある周波数帯域にわたってスペクトルの形に変動がなければ最終的に得ら

れる結果に影響はない。各チャンネルの出力差のアラン分散を測定することでバンドキャラクター(周波数応答性)の安定度を評価する。単位時間ごとに連続で N 回サンプリングした K5/VSSP32 のあるチャンネルのデータ列と、それとは別のチャンネルのデータ列を連続で同時に取得する。 i 番目のデータをそれぞれ x_i, x'_i とおき、 $x_i - x'_i (i=1 \sim N)$ を K 個ずつ平均したデータ列 $R_n'(K)$ をつくる。

$$R_n'(K) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_{nK+i} - x'_{nK+i}), \quad (4.3)$$

$M = \frac{N}{K} - 1$ として、 $n = 0, 1, 2, \dots, M$ である。 $R_n'(K)$ に対して分散 σ_A^2 を以下のように定義する。この分散を分光アラン分散とよぶ。

$$\sigma_A^2(K) = \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^M \{R_{n-1}'(K) - R_n'(K)\}. \quad (4.4)$$

分光アラン分散のアランプロットが示すランダムノイズが卓越する時間スケールはバンドキャラクターが安定である時間スケールを意味している。分光アランプロットにおいてドリフトが卓越するとベースラインがうねり、分光データから輝線を正確に抽出することが難しくなる。

4.4 高萩アンテナにおけるアラン分散測定

2013 年 12 月から 2014 年 1 月にかけて、22GHz 帯受信機 1 号機を搭載した高萩アンテナに対し、単一鏡観測における観測システムが安定な時間スケールを求めるためにアラン分散測定を行った。高萩アンテナは仰角方向の駆動装置が故障中であるため、仰角は 90 度で固定とした。

測定方法

高萩アンテナが向いている仰角 90 度の状態で空をみている場合と、電波吸収体で電波望遠鏡の給電ホーン上部を覆った状態で測定を行った。電波吸収体を用いた測定では大気の影響を取り除き、装置のみの安定度を評価できる。仰角 90 度の測定はシステムが安定な時間スケールの天候依存性を評価するために 3 回行った。観測時間は全て 8 時間である。電波吸収体の測定の際は給電ホーン内の乾燥空気循環装置(デハイド)を止めて行った。これは、給電ホーン上部膜の変形による定在波の発生を防ぐためである(2011 田中 修士論文)。SG の出力周波数は水メーザー(22.235080GHz)を観測する際と同じ値に設定した。

表 4.2: 高萩アンテナ 22GHz 帯アラン分散測定 観測諸元

測定日	2013 年 12 月 20 日	2013 年 12 月 29 日	2014 年 1 月 4 日	2014 年 1 月 6 日
測定時間	11:30-19:30	19:20-翌 3:20	14:50-22:50	16:30-翌 0:30
アンテナ仰角	90 度*	電波吸収体	90 度	90 度
天候	雨		晴れ	晴れ
観測時間	8 時間			
アンテナ	高萩アンテナ			
観測周波数	22.219-22.251GHz			
分光計設定	64MHz サンプリング, 4bit, 2048 点分光			
偏波	LHCP			

*測定開始時は 90 度であったが、12 月 21 日の 16 時 30 分には 70 度になっていた。カップリングトルクの減少と強風により仰角が変化したと考えられている。12 月 20 日の測定中にアンテナが傾いてしまった可能性もある。

分光計の 1010 番目の出力(ch1010)の絶対値と 7 組の 2 チャンネル間の出力差(ch1010-ch1110, ch910-ch1110, ch910-ch1210, ch810-ch1210, ch710-ch1210, ch510-ch1510, ch10-ch2010)に対するアランプロットを作成し、それぞれの測定条件での観測システムの安定時間を評価した。

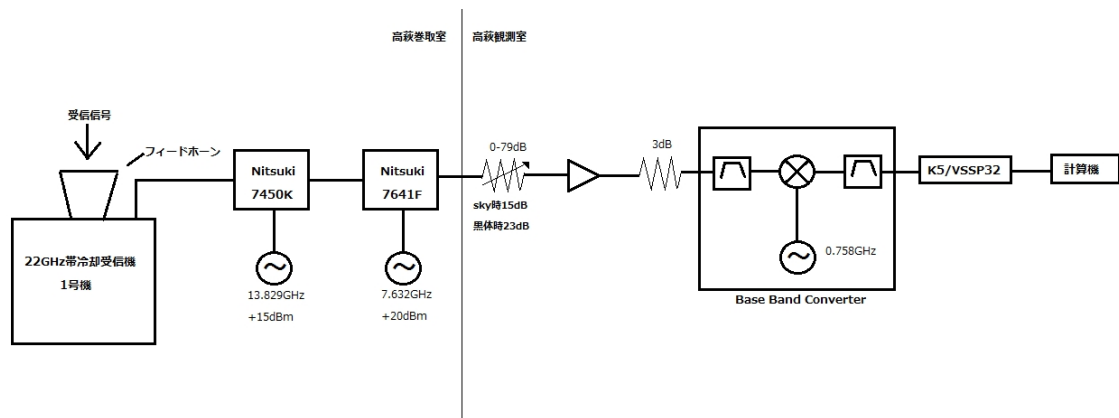


図 4.2: 高萩アンテナアラン分散測定時の観測システムの構成

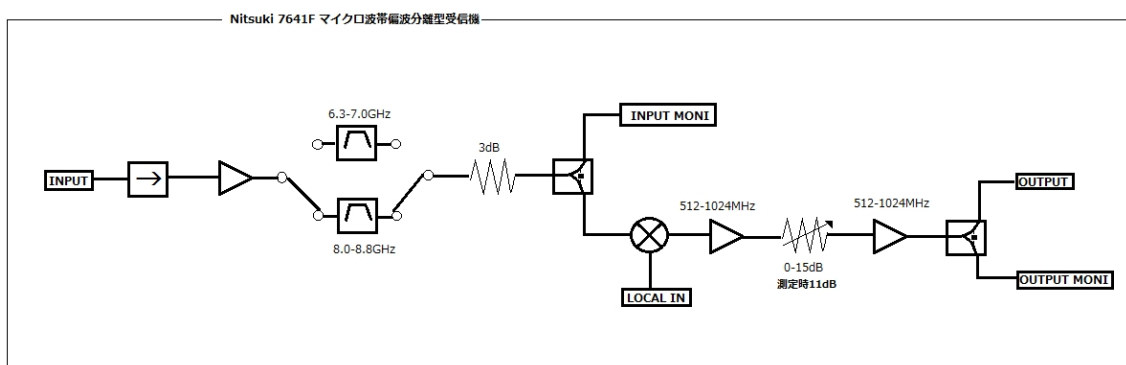


図 4.3: Nitsuki 7641F マイクロ波帯偏波分離型受信機のブロックダイアグラム

結果

得られたアランプロットは図 4.4～図 4.7 の通りである。

アランプロットから得られた安定時間を表 4.3 にまとめた。

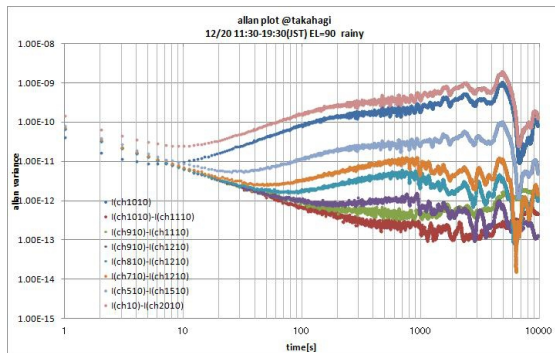


図 4.4:EL=90° (12月20日)アランプロット

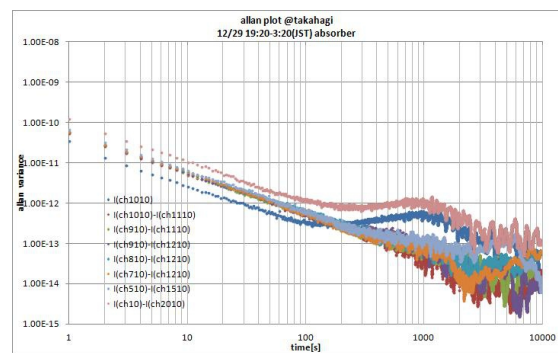


図 4.5:電波吸収体出力(12月29日)アランプロット

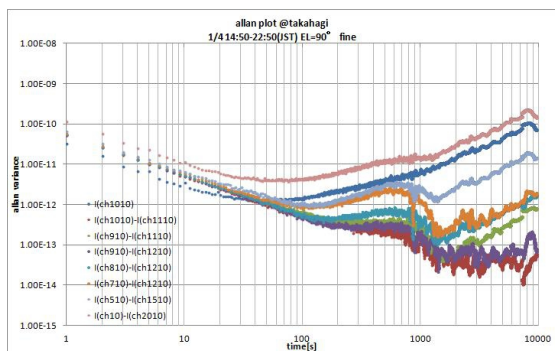


図 4.6:EL=90° (1月4日)アランプロット

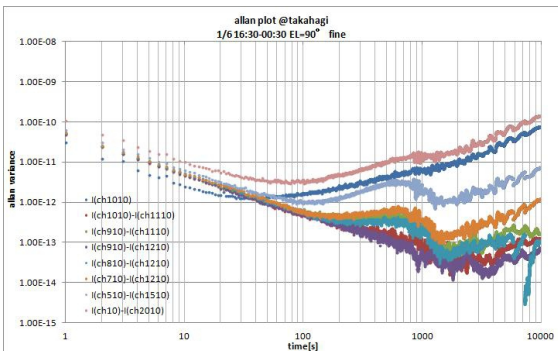


図 4.7:EL=90° (1月6日)アランプロット

表 4.3:高萩アンテナ 22GHz 帯アラン分散測定結果

測定日	12月29日	12月20日	1月4日	1月6日
アンテナ仰角	電波吸収体	90度	90度	90度
天候		雨	晴れ	晴れ
絶対値の安定時間	100秒	6秒	40秒	30秒
2ch間の相対値の安定時間	200-1000秒	9-300秒	70-600秒	70-500秒

2度の晴天時の仰角 90 度の測定では測定結果は大きく変わらなかった。仰角 90 度での雨天時と晴天時の安定時間を比較すると、雨天時では安定時間がとても短くなっている。

考察

この測定では、1ch の絶対値の安定時間と 2ch 間の相対値の安定時間を求めた。2ch 間の相対値の安定時間はバンドキャラクタの安定度を評価しており、分光観測の際の指標となる。晴天時において、相対値の最短の安定時間は 70 秒程度であった。実際に単一鏡分光観測を行う際は、得られた安定時間より短い時間内で ON 点と OFF 点の切り替えを行わなければならない。また、雨天時の測定結果から、天候が悪いと安定時間が短くなってしまう。雨天時は、雲などに含まれる水滴や水蒸気の放射や吸収が働くため、安定時間が短くなると考えられる。

装置のみの安定度は絶対値で 100 秒、相対値で 200 秒と長い安定時間が得られた。積分時間が長くなるにつれプロットのゆらぎが大きくなっている。これは積分時間 K が大きくなるにつれ、分散のサンプル数 M が少なくなってしまうためと考えられる。

4.5 日立アンテナにおけるアラン分散測定

2014 年 1 月に、22GHz 帯受信機 2 号機を搭載した日立アンテナに対して、単一鏡観測における観測システムが安定な時間スケールを求めるためにアラン分散測定を行った。

測定方法

仰角 15 度, 30 度, 90 度の状態と電波吸収体で電波望遠鏡の給電ホーン上部を覆った状態で測定を行った。3 つの仰角で測定を行った理由は、システムが安定な時間スケールの仰角依存性を評価するためである。天候依存性も評価するために、仰角 15 度では 3 回、仰角 30 度では 2 回、仰角 85 度では 2 回測定を行った。観測時間は全て 8 時間である。電波吸収体の測定の際は給電ホーン内の乾燥空気循環装置(デハイド)を止めて行った。分光計や SG の設定は、高萩アンテナにおける測定と同一である。

表 4.4 日立アンテナ 22GHz 帯アラン分散測定観測諸元

測定日	2014 年 1 月 15 日	2014 年 1 月 17 日	2014 年 1 月 19 日	2014 年 1 月 19 日
測定時間	19:40-翌 3:40	9:30-17:30	2:58-10:58	12:25-20:25
アンテナ仰角	85 度	30 度	15 度	30 度
天候	晴れ	くもり	雪-晴れ	晴れ
O/E 後 Att	11dB	12dB	14dB	11dB
測定日	2014 年 1 月 23 日	2014 年 1 月 24 日	2014 年 1 月 28 日	2014 年 1 月 29 日
測定時間	18:02-翌 2:02	3:50-11:50	18:00-翌 2:00	12:25-20:25
アンテナ仰角	15 度	電波吸収体	15 度	85 度
天候	晴れ		晴れ	晴れ
O/E 後 Att	11dB	12dB	14dB	10dB
観測時間	8 時間			
アンテナ	日立アンテナ			
周波数帯域	22.219-22.251GHz			
分光計設定	64MHz サンプリング, 4bit, 204			
偏波	LHCP			

高萩アンテナの測定の際と同様にアランプロットを作成し、それぞれの測定条件での観測システムの安定時間を評価した。

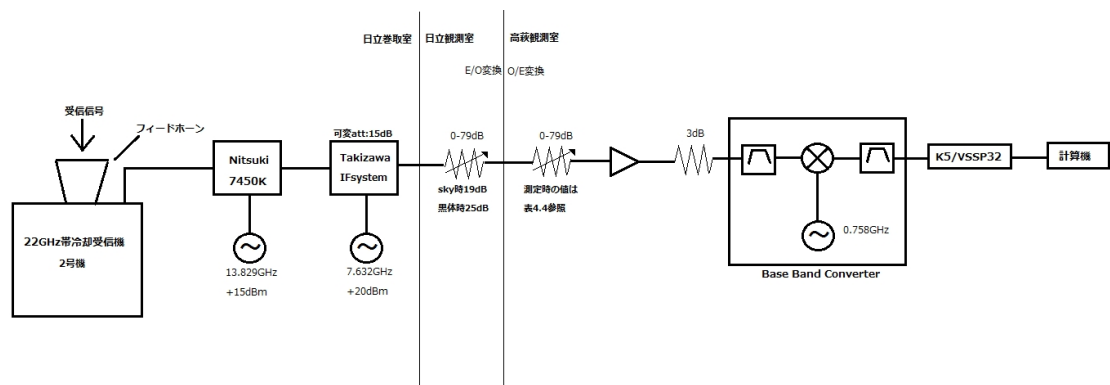


図 4.8: 日立アンテナアラン分散測定時の観測システムの構成

結果

得られたアランプロットは図 4.9～図 4.16 の通りである。

アランプロットから得られた安定時間を表 4.5 にまとめた。

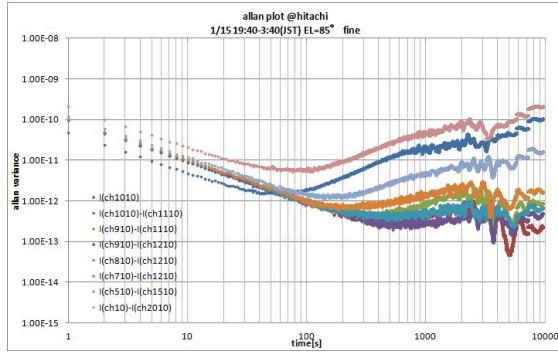


図 4.9:EL=85° (1月 15 日)アランプロット

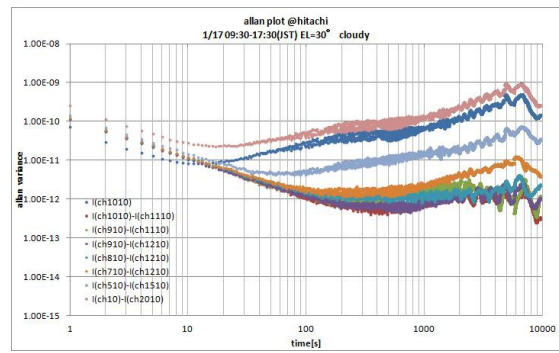


図 4.10:EL=30° (1月 17 日)アランプロット

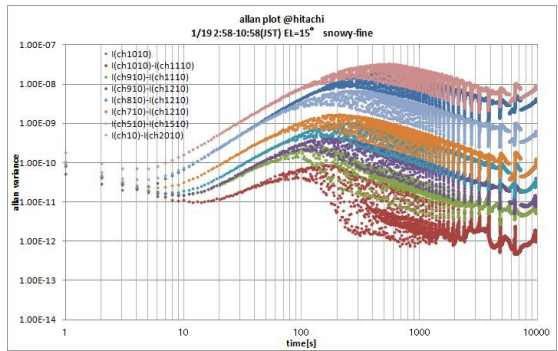


図 4.11:EL=15° (1月 19 日)アランプロット

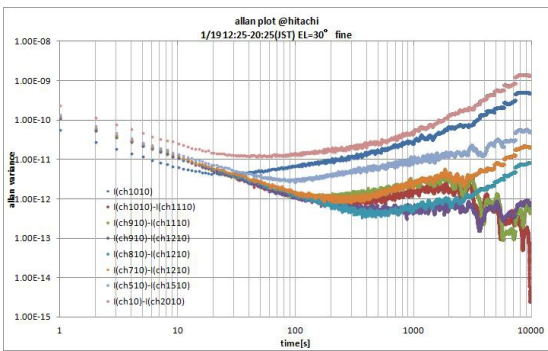


図 4.12:EL=30° (1月 19 日)アランプロット

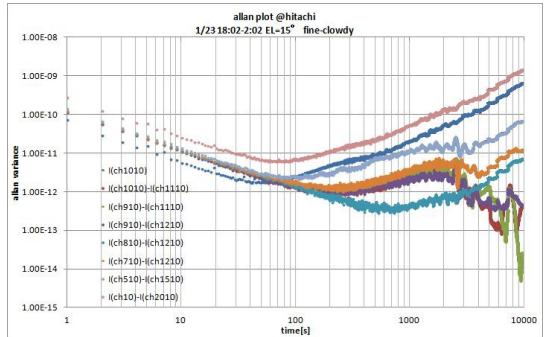


図 4.13:EL=15° (1月 23 日)アランプロット

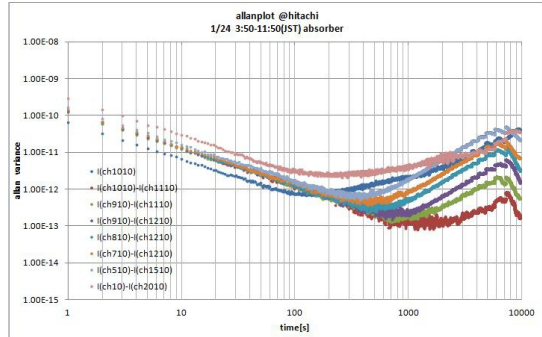


図 4.14:電波吸収体出力(1月 24 日)アランプロット

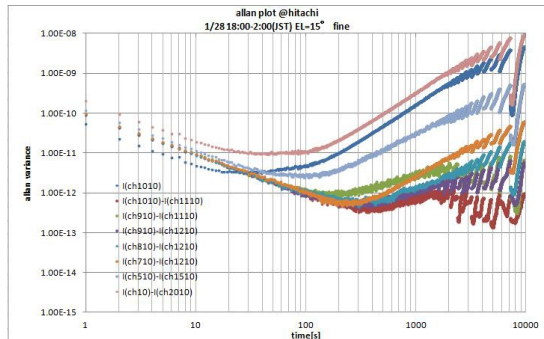


図 4.15:EL=15° (1月 28 日)アランプロット

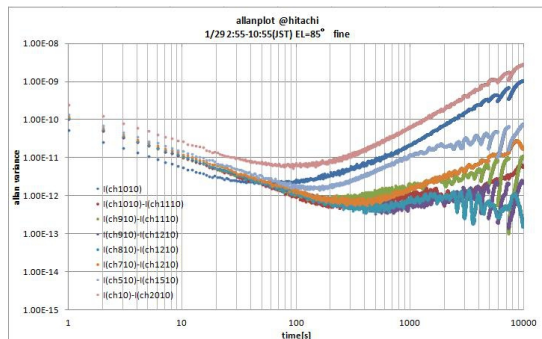


図 4.16:EL=85° (1月 29 日)アランプロット

表 4.5: 日立アンテナ 22GHz 帯アラン分散測定結果

測定日	1 月 24 日	1 月 19 日	1 月 23 日	1 月 28 日
アンテナ仰角	電波吸収体	15 度	15 度	15 度
天候		雪-晴れ	晴れ	晴れ
開始時 T_{sys}^*	55.0K	58.3K	53.3K	60.7K
開始時 τ	0.053	0.059	0.054	0.070
終了時 T_{sys}^*	51.1K	45.1K	55.0K	49.2K
終了時 τ	0.048	0.030	0.053	0.037
絶対値の 安定時間	100 秒	4 秒	40 秒	20 秒
2ch 間の相対値 の安定時間	200-800 秒	4-10 秒	60-500 秒	30-400 秒
測定日	1 月 17 日	1 月 19 日	1 月 15 日	1 月 29 日
アンテナ仰角	30 度	30 度	85 度	85 度
天候	くもり	晴れ	晴れ	晴れ
開始時 T_{sys}^*	55.5K	45.1K	未測定	49.2K
開始時 τ	0.058	0.028		0.037
終了時 T_{sys}^*	50.6K	48.9K		52.4K
終了時 τ	0.040	0.032		0.043
絶対値の 安定時間	10 秒	20 秒	50 秒	50 秒
2ch 間の相対値 の安定時間	20-200 秒	30-400 秒	70-400 秒	70-500 秒

表 4.5 における T_{sys}^* は天頂方向、大気込みの値である。

電波吸収体出力の測定を除いては、仰角 85 度の測定で最も長い安定時間が得られた。また、悪天候時の測定では安定時間が短くなっている。

考察

晴天時において相対値の最短の安定時間は 30 秒程度であった。実際に単一鏡分光観測を行う際は得られた安定時間より短い時間内で ON 点と OFF 点の切り替えを行わなければならない。仰角 85 度の測定で最も安定時間が長くなった要因は他の仰角と比べ大気による影響を受けにくいと考えられる。また、悪天候時は安定時間が短くなってしまうため注意が必要である。

装置のみの安定度は絶対値で 100 秒、相対値で 200 秒と長い安定時間が得られた。22GHz 帯冷却受信機を搭載した安定時間は、大気の状態に大きく左右されることがわかった。

第5章 まとめ

茨城 32m 電波望遠鏡用 22GHz 帯冷却受信機 2 号機を組み立て、性能測定を行った。受信機単体雑音温度測定及び、日立アンテナ搭載時のシステム雑音温度測定では低い雑音温度の値が得られた。高感度な受信機システムを完成させることができた。

22GHz 帯冷却受信機 1 号機を搭載した高萩アンテナ、22GHz 帯冷却受信機 2 号機を搭載した日立アンテナにおいてアラン分散測定を行い単一鏡としての観測システムの安定時間を得ることができた。日立アンテナにおける測定から安定時間のアンテナ仰角及び天候依存性がみられた。高萩アンテナは仰角方向の駆動装置が故障中であったため仰角依存性は評価できなかった。

今後、実際に天体の分光観測を行い、アラン分散測定で得られた安定時間が適切かどうか評価を行う必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方にご指導ご協力いただきました。百瀬宗武先生には、電波天文学について基礎からご教授いただきました。また、研究活動のみならず学生生活面でも大変お世話になりました。米倉寛則先生には電波望遠鏡に関することや性能測定の方法について詳しくご教授いただきました。また、受信機の組立や性能評価に携わる機会を私に与えていただきました。研究環境を整えていただいた指導教官のお二人に心から感謝申し上げます。

小川英夫先生をはじめとする大阪府立大学の皆様には受信機組立の出張の際に私を受け入れていただきました。組立の過程において多くのご助言をいただきました。心から感謝申し上げます。

研究員の古川尚子氏、宮本祐介氏には性能測定の方法について丁寧にご指導していただきました。また、MAS 16 巻のゼミの際には電波天文学についてご教授いただきました。

修士2年の森智彦氏には受信機に関することについて一から熱心に教えていただきました。また、受信機チームのリーダーとして受信機に関わる研究を引っ張っていただきました。博士2年の齋藤悠氏には性能測定の解析方法をご指導いただきました。修士2年のスンカンロウ氏には円偏波分離器の原理や導波管の性能評価の方法についてご教授いただきました。

学部4年の安井靖堯氏とは受信機の組立や性能測定において多くの時間を共にし、助け合いながら研究を進めて参りました。学部4年の中村英斗氏、山田淑乃氏とは同じ学際理学コース所属として入学時から四年間、切磋琢磨して参りました。学部4年の沖本有氏、加古琳一氏、永瀬桂氏とはゼミの際に有意義な議論を交わすことができました。

研究員の塚越崇氏、修士2年の岡本雄大氏、影近早香氏、根本貴文氏、修士1年の石井翔太氏、佐藤雄貴氏には日頃の研究活動を優しく支えていただきました。

本研究室に関わる皆様に心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 中井直正、坪井昌人、福井康雄 シリーズ現代の天文学 16 宇宙の観測Ⅱ-電波天文学
- [2] 滝沢美里 茨城大学 理工学研究科 2011 年修士論文
茨城 32m 電波望遠鏡用 6.5-8.8GHz 帯低雑音広帯域受信機システムの開発
- [3] 田中智明 茨城大学 理工学研究科 2011 年修士論文
茨城 32m 電波望遠鏡の単一鏡観測システムの開発
- [4] 海田正大 他 2006 年 東京学芸大学紀要自然科学系 58, 131-149
60cm 電波望遠鏡の音響光学型電波分光計の開発
- [5] 秋里昂 他 2009 年 東京学芸大学紀要自然科学系 61, 63-71
1.85m 電波望遠鏡 FFT 電波分光計システムの安定性の評価
- [6] 大学連携 VLBI (<http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/jvn/index.html>)
- [7] 茨城大学宇宙科学教育研究センター (<http://www.asec.ibaraki.ac.jp/>)

