

修 士 学 位 論 文

茨城 32m 電波望遠鏡の 単一鏡分光観測システム開発

2011 年度
(平成 23 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

10NM161A

田中 智明

概 要

現在、茨城大学では、茨城県高萩市および日立市にまたがる 2 台の 32 m 電波望遠鏡の立ち上げを行っている。これらの観測予定周波数は 6.7, 8.4, 22 GHz 帯である。本研究では、単一鏡分光観測の実現に必要な分光計の整備および環境構築を行った。

単一鏡分光観測システムの開発に用いたのは、情報通信研究機構 (NICT) が開発したサンプラー K5/VSSP32 である。K5/VSSP32 は入力信号を本体部分でサンプリングし、USB2.0 で PC に転送し、解析を行う分光計であり、データを取得して後日解析することが可能である。現在開発しているシステムでは、K5/VSSP32 に直接つながった PC から観測生データを解析用 PC へ転送し、乗算、FFT を行い、分光点数 200 万点のパワースペクトルを得ている。その後、観測スケジュールファイルとパラメータファイルから、地系ドップラー補正、周波数から速度への変換、分光点数の変更を行う。それをパワー [dBm] から観測フラックス密度 [Jy] へと変換し、データ解析ツールが読み込み可能なファイル形式へ変換する。以上の動作を可能とする一連の開発を行った。

また、K5/VSSP32 を天文観測で使用するために必要なハードウェアの性能評価も行った。

まずはじめに、分光計への最適入力強度を決定するリニアリティ測定を行った。リニアリティ測定の具体的な方法として、ホーン開口部分に常温の電波吸収体をかぶせ、その出力を K5/VSSP32 で取得した。その際、アッテネータを用いて、K5/VSSP32 への入力強度を -15 dBm $\sim$ $+10$ dBm まで変えて測定した。結果は、0 dBm 入力時のパワーを基準にして、残差が 5 % 以内である範囲をリニアリティがあると評価した。その結果、リニアリティが保たれる入力強度のパワーは -5 dBm $\sim$ $+5$ dBm であることを明らかにした。

次に、測定時間 t に対しノイズが $1/\sqrt{t}$ に比例して減少する時間スケールを求めるために、システム安定度の測定を行った。システム安定度の測定では、EL85°、EL30°、EL15°、電波吸収体放射の入力の 4 通りで 8 時間データを取り続け、32 MHz の帯域幅を 2048 点分光してパワースペクトル 1 ch のアラン分散、離れた 2 ch 間のアラン分散をそれぞれ求めた。その結果、連続波観測の ON-OFF スイッチ時間の指標となる 1 ch の安定時間は 10 秒程度であった。そのため、連続波の観測では、ON-OFF スイッチを非常に短い時間で行わなければならないことがわかった。分光観測の ON-OFF スイッチ時間の指標となる 2 ch 間の安定時間は 400 秒程度であった。また、求めた安定時間より十分に短い時間スケールでメタノールメーザーの ON-OFF 観測を行ったところ、理論通り、 $1/\sqrt{t}$ に比例してノイズが減少することを確認した。

目次

1	電波天文学について	1
1.1	電波天文学とは	1
1.2	電波望遠鏡の構成	1
1.2.1	アンテナ	2
1.2.2	受信機	2
1.2.3	検波器・分光器	2
1.3	単一鏡観測	3
1.4	分光計	4
1.4.1	分光計の概要	4
1.4.2	デジタル分光計	4
1.4.3	標本化	4
1.4.4	量子化	5
1.4.5	フーリエ変換	5
2	茨城 32m 電波望遠鏡を用いた分光観測について	7
2.1	使用する分光計	7
2.2	茨城 32m 電波望遠鏡での分光観測の意義	9
3	システム開発	10
3.1	システム開発の内容	10
3.2	システムの処理の流れ	11
3.3	地系ドップラー補正	11
3.4	各機能の内容	12
3.4.1	a_parameter	12
3.4.2	putftrkcal2_iba	12
3.4.3	output	13
3.4.4	anttemp	15
3.4.5	obsfluxdensity	16
3.4.6	baseline	17
3.4.7	integration	17
3.5	試験観測	18
3.6	まとめ	20
3.7	今後の課題	20
4	ハードウェアの性能評価	21
4.1	K5/VSSP32 のリニアリティ測定と最適入力レベルの決定	21
4.1.1	測定方法	21
4.1.2	解析方法	22

4.1.3	結果	23
4.1.4	考察	25
4.2	観測システムの安定性測定	27
4.2.1	安定度の指標	27
4.2.2	測定方法	29
4.2.3	結果	29
4.2.4	考察	32
4.3	まとめ	36
4.4	今後の課題	36
5	まとめ	37

1 電波天文学について

1.1 電波天文学とは

宇宙からは様々な波長の電磁波が降りそそいでいる。その中でも電波を受信することによって、宇宙や天体の有り様を解明する学問を電波天文学と呼ぶ。

電波天文学には、他の波長に比べていくつかの特徴がある。

- 地上から観測できる数少ない波長帯の一つである点。そのため、望遠鏡の大口径化が容易で、より精度の高い観測を行うことができる。
- 波長が長い点。ダストによる吸収を受けないため、銀河面の奥深いところまで見通せる。つまり、他の波長では見ることのできない領域の構造を解明することができる。
- 他波長では見えないものを見ることができる点。極低温の分子ガスやガス密度の高いメーザー源からの放射など、星形成過程の解明に電波観測は必須である。また、シンクロトロン放射や中性水素原子からの放射など、様々な天体現象からの放射を観測することができる。

1.2 電波望遠鏡の構成

電波望遠鏡は大きくわけて、アンテナ、受信機、検波器または分光器、そしてそれらを制御しデータの取得・解析をする計算機によって構成される。

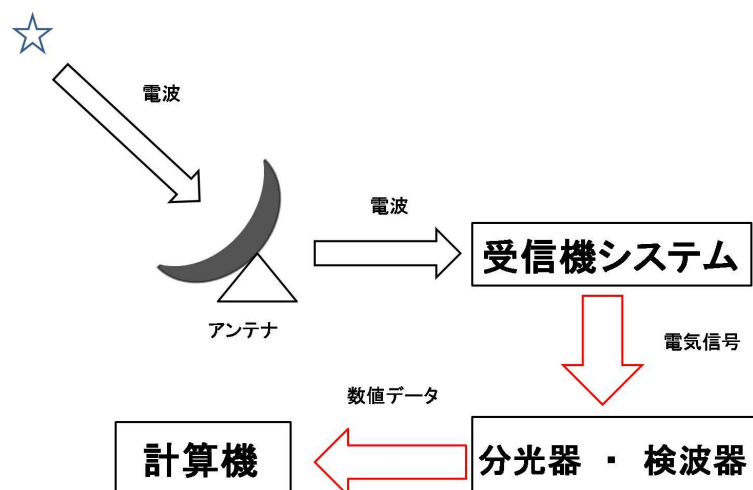


図 1: 電波望遠鏡の構成

1.2.1 アンテナ

アンテナは天体からの電波を集める装置で、その性能は、指向精度や鏡面精度、駆動性能などによって決められる。電波望遠鏡が積分時間 t で検出できる最小のフラックス密度 ΔS は式 (1) から求まる。これは、大口径の望遠鏡ほど感度が良くなることを示している。また、式 (2) から角度分解能も高くなることもわかる。

$$\Delta S(\text{single}) = \frac{2K_S}{\eta_A A_P} \frac{kT_{\text{sys}}}{\sqrt{Bt}}, \quad (1)$$

ただし、 K_S は受信方式による係数、 η_A はアンテナの開口能率、 A_P はアンテナの開口面積、 k はボルツマン定数、 T_{sys} はシステム雑音温度、 B は受信周波数幅である。

$$\text{アンテナの角度分解能} \propto \frac{\lambda}{D}, \quad (2)$$

ただし、 λ は波長、 D はアンテナ口径である。

1.2.2 受信機

受信機は、天体からの微弱で高周波の電波を、装置の扱いやすい強度や周波数の電気信号へと変換する役割がある。強度変換には、強度を増幅させる増幅器 (アンプ) や強度を減衰させる減衰器 (アッテネータ) が用いられる。強度や周波数の変換の際、天体からの電波に比べてアンプの熱雑音が大きいため、雑音も増幅されてしまい信号に対する雑音の割合が大きくなってしまう。そこで、受信機では低雑音のアンプ (LNA) を使用し、受信機自体を冷却することによって熱雑音を小さくする手法が取られていることが多い。周波数変換は、ミキサーと呼ばれる 2 つの信号を混ぜる装置を用いて、天体からの信号と局部発振器 (LO) 信号との積の成分を取り出すことで行う。ミキサーに異なる 2 つの信号を入力することで、それぞれの周波数の和または差の周波数を持つ信号を作ることができる。フィルターで差周波数の信号のみを取り出せば、高い受信周波数成分を低い周波数へと移動することができる。

受信機は望遠鏡の信号処理系前端に位置するため、フロントエンドと呼ばれる。

1.2.3 検波器・分光器

天体からの電波のスペクトルには、大きく分けて連続波と線スペクトルがある。連続波は、周波数に対して連続的にエネルギー分布しているものを指し、線スペクトルは、特定の周波数に鋭い吸収あるいは放射を持つスペクトルのことを指す。これらを観測する際、スペクトルの特徴に応じて望遠鏡の受信方法が異なる。連

続波を観測する際に必要な装置は検波器 (パワーメーター) である。広い周波数幅で積分された強度にのみ興味がある連続波観測では、天体からの受信電波をそのまま 2 乗検波する検波器を用いる。線スペクトルを測定する際に必要な装置は分光器であり、分光器を用いた観測を分光観測と呼ぶ。分光観測では、特定の周波数におけるスペクトルの特徴から、ガスの分子種や力学的運動を明らかにすることができる。

検波器・分光器は望遠鏡の信号処理系後端に位置するため、バックエンドと呼ばれる。

1.3 単一鏡観測

単一鏡で天体観測を行う際、日周運動で動く天体を継続して追尾するのではなく、ポジションスイッチング法と呼ばれる操作を行う。ポジションスイッチ法とは、アンテナを天体 (ON 点) に向けたときの強度とアンテナを天体周辺の放射源のない領域 (OFF 点) に向けたときの強度を一定間隔でスイッチする観測法である。

また、黒体とみなせる電波吸収体の出力と OFF 点の出力を比較することによって、大気の吸収量を見積もることができる。天体が大気吸収を受けなかったときに得られるアンテナ温度を T_A^* とする。このときに地上の望遠鏡で受信する ON 点、OFF 点、電波吸収体出力 (R) の単位周波数幅あたりのパワーはそれぞれ、

$$P_\nu(\text{ON}) = G[T_A^* e^{-\tau} + (1 - e^{-\tau})T_{\text{atm}} + T_{\text{RX}}] \quad (3)$$

$$P_\nu(\text{OFF}) = G[(1 - e^{-\tau})T_{\text{atm}} + T_{\text{RX}}] \quad (4)$$

$$P_\nu(\text{R}) = G[T_{\text{amb}} + T_{\text{RX}}] \quad (5)$$

となる。ただし、 G は受信機の増幅率などの係数、 T_{atm} は電波が通過する大気の温度、 T_{amb} は望遠鏡周囲の温度、 T_{RX} は受信機の雑音温度、 τ は地球大気の光学的厚みである。式 (3)、式 (4)、式 (5) を組み合わせると、

$$\frac{P_\nu(\text{ON}) - P_\nu(\text{OFF})}{P_\nu(\text{R}) - P_\nu(\text{OFF})} = \frac{T_A^* e^{-\tau}}{T_{\text{amb}} - (1 - e^{-\tau})T_{\text{atm}}} \quad (6)$$

となる。ここで、 $T_{\text{amb}} = T_{\text{atm}}$ と仮定すると、 T_A^* は式 (7) のように表せる。

$$T_A^* = \left[\frac{P_\nu(\text{ON}) - P_\nu(\text{OFF})}{P_\nu(\text{R}) - P_\nu(\text{OFF})} \right] T_{\text{amb}}. \quad (7)$$

これをチョッパーホイール法といい、これを用いれば大気からの放射や吸収、望遠鏡の装置によるノイズを補正して天体の真のアンテナ温度 T_A^* を求めることができる。また、 $T_{\text{amb}} = T_{\text{atm}}$ を仮定したことによる誤差が 10 - 15 % 程度と、測定が簡便であるにも関わらず、比較的精度よく強度較正できる。

1.4 分光計

1.4.1 分光計の概要

分光観測を行うためには、受信した電波を周波数方向に分解する電波分光計が必要である。分光計には、スペクトラムアナライザやデジタル分光計などの種類があり、それぞれ観測に必要な性能に応じて選択する。

1.4.2 デジタル分光計

デジタル分光計は、アンテナで受信した電磁波から変換された電気信号をアナログ信号からデジタル信号へ変換した後、計算機で処理を行う分光計である。アナログ信号からデジタル信号への変換は、標本化と量子化の 2 つの操作によって行われる。また、入力信号のパワースペクトルへの変換には大きく 2 つの方法がある。

第一は、自己相関関数を導出した後、それをフーリエ変換してパワースペクトルを得る XF 型と呼ばれる分光計である。自己相関関数 $C(\tau)$ は、時刻 t における電圧 $V(t)$ と時間 τ だけ遅れた時刻 $t + \tau$ における電圧 $V(t + \tau)$ としたとき、以下のように定義される。

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V(t)V(t + \tau)dt. \quad (8)$$

$C(\tau)$ はパワーに比例する量となっている。

第二は、電圧信号 $V(t)$ をフーリエ変換したものを 2 乗してパワースペクトルを得る FX 型と呼ばれる分光計である。これらは、測定時間が十分長い極限ではお互い数学的に等価である。

1.4.3 標本化

標本化 (サンプリング) とは、連続的な信号を一定時間間隔でサンプルすることで、時間方向に離散的な信号に変える操作のことである。分光計への入力通常、帯域幅が限られたノイズである。このような信号を標本化する場合、ノイズの周波数帯域を $[0, B]$ として、サンプリング周波数が $2B$ 以上であれば元の信号の情報は失われない。これをナイキストのサンプリング定理という。

分光計への入力帯域幅がサンプリング周波数の半分より広い場合、元の信号の 2 つの周波数成分が、標本化後に区別できなくなる現象が起こる。これを、エイリアシングという。エイリアシングを防ぐためには、分光計入力前に適当なフィルタを入れることで帯域を制限すればよい。

この一方で、エイリアシングを利用した「高次サンプリング」と呼ばれる手法もある。これは、バンド幅 B の信号を入力する場合、その帯域を $[0, B]$ と取る代わりに $[2nB, (2n+1)B]$ (ただし、 n は任意の整数) と取る方法で、バンド幅内に信号が折り返され、結果的にはどちらの場合も元の信号が持っていた情報が完全に保持される。

1.4.4 量子化

量子化は、入力信号を有限語長のデジタル信号に直す操作である。つまり、アナログ信号の振幅値を離散化することである。量子化により離散的なデータへと変換すると、元の連続的な信号と比べて失われてしまう情報が出てくる。このとき量子化ビット数が小さいと、元の信号から失われてしまう情報が多くなるため、その分雑音に対する信号比は下がる。これを量子化損失という。雑音パワーに対して十分小さい信号を観測した場合の、量子化ビット数と量子化損失の影響を考慮した相対感度との関係を表 1 に表す。ここで、量子化前の信号を相対感度 1 とした。

量子化ビット数	相対感度
1	0.64
2	0.88
3	0.94
∞	1

表 1: 量子化ビット数と量子化損失の影響を考慮した相対感度との関係

電波天文では多くの場合、受信する信号は受信帯域内で一様なパワーを持つノイズとみなせるため、信号の統計的性質のみが重要である。そのため同一ビットレート同士で比較すると、量子化ビット数を大きくするよりむしろ、サンプリング周波数を大きくしたほうが連続波に対する感度向上は大きい。

1.4.5 フーリエ変換

望遠鏡が受信した信号は、一般的に様々な周波数成分を持っている。しかし、受信した信号は時間の関数として記録されるので、このままでは周波数成分を得ることができない。そこで、フーリエ変換により時間領域の信号 $V(t)$ を周波数領域のスペクトル $\tilde{V}(\nu)$ へと変換する。

$$\tilde{V}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} V(t) e^{-2\pi i \nu t} dt. \quad (9)$$

デジタル分光計では、連続的な入力信号 $V(t)$ を離散的なデジタル信号 $V^*(t)$ へ変換した後、フーリエ変換を行う。デジタル化された信号は、サンプルする周期を T 、 n を任意の整数すると

$$V^*(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} V(t)\delta(t - nT) \quad (10)$$

となり、元の信号に δ 関数列をかけたものとして表現される。

一回の計算で処理するサンプル点の数を N として、式 (10) を用いて式 (9) を書き換えると

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} V^*(t)\exp\left(\frac{-2\pi i k n}{N}\right) \quad (11)$$

が得られる。これを離散フーリエ変換 (DFT) と呼ぶ。

デジタル分光計でのフーリエ変換の計算には、通常、高速フーリエ変換 (FFT) が用いられる。それぞれの計算結果は同じであり、FFT で計算することで計算量が N^2 から $N\log_2 N$ となる。したがって、サンプル数 N が大きい場合には、FFT の方が計算量がはるかに少なくなる。

2 茨城 32m 電波望遠鏡を用いた分光観測について

2.1 使用する分光計

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実現する。

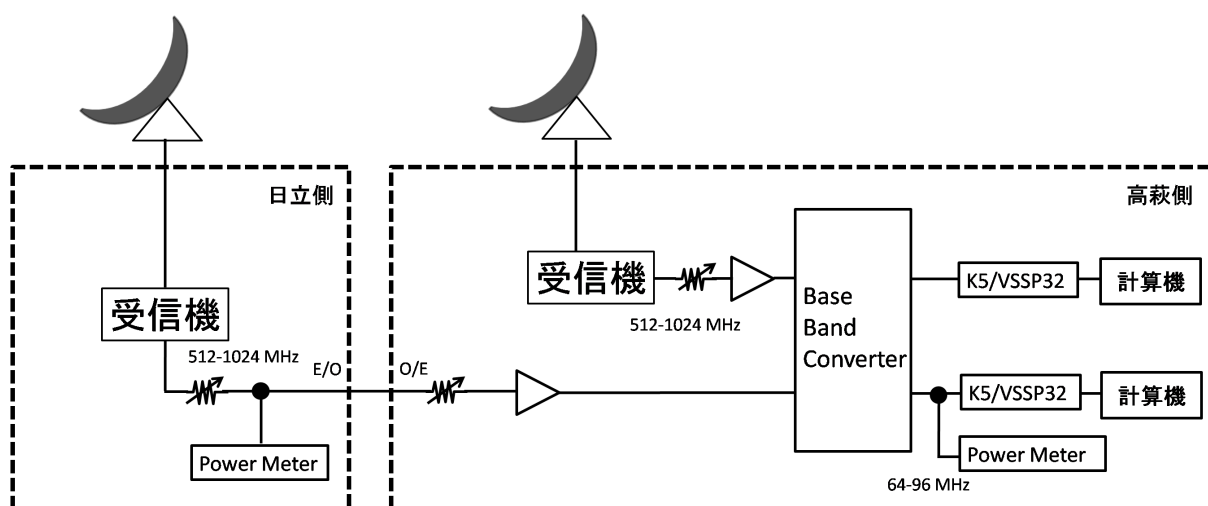


図 2: 茨城 32m 電波望遠鏡のシステム構成

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、取得したデータからパワースペクトルを得ることができる。K5/VSSP32 のスペックについて表 2 にまとめた。

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 (MHz)	2, 4, 8, 16, through
AD 変換器アナログ帯域幅 (MHz)	300
AD 量子化ビット数 (bit)	1, 2, 4, 8
入力電圧範囲	-1V ~ +1V
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	256 Mbps
標準 (参照) 信号入力	1 PPS, 10 MHz または 5 MHz
PC とのインターフェイス	USB2.0

表 2: K5/VSSP32 のスペック

また、観測・データ処理用ソフトウェア群の主に用いる機能についても表 3 にまとめた。

コマンド名	機能
timesettk	K5/VSSP32 ユニットの時刻をセットする。
timedisp	K5/VSSP32 ユニットの時刻を表示する。
monit	K5/VSSP32 ユニットの入力信号レベルのモニター
autoobs	スケジュールファイルでの自動観測モード
sampling	手動による観測モード
speana2	データ処理ソフト。パワースペクトルデータ (speana2.txt) を得ることができる。

表 3: 観測・データ処理用ソフトウェア群の主な機能

分光点数は 2048 点 (以下 2K 点) と 2097152 点 (以下 2M 点) の 2 つから選択することができ、ソフトウェア群から出力されるパワースペクトルは横軸周波数 (kHz)、縦軸パワー (dBm) である (図 3)。

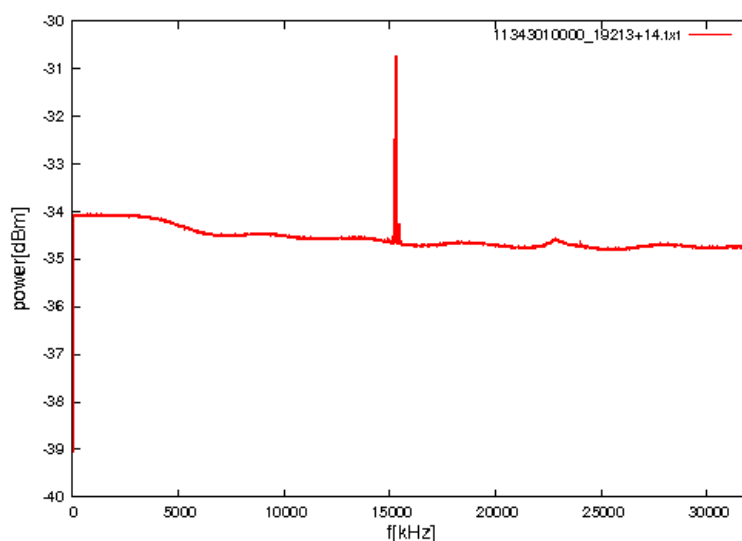


図 3: speana2 実行後の出力スペクトル

茨城 32m 電波望遠鏡では 64 MHz サンプリング、4 bit か 32 MHz サンプリング、8 bit で高次サンプリングを行う予定である。

2.2 茨城 32m 電波望遠鏡での分光観測の意義

茨城 32m 電波望遠鏡における第一の観測目的は、大学連携 VLBI での大質量星形成や活動銀河核の仕組みの解明を行うことにある。しかし、大学連携 VLBI に使用する以外の時間も十分にあり、その間は単独の装置として研究に使用することができる。茨城 32m 電波望遠鏡は冷却受信機を搭載しており、高感度な観測が可能である。したがって、単一鏡観測におけるメーザースポットのサーベイや時間的に密なモニタ観測などを行い、大質量星形成の解明などに貢献することが期待される。そこで、メーザーのような線スペクトルを観測するために分光計の立ち上げを行う必要があった。本研究では K5/VSSP32 からの出力データを天文研究に必要なデータへと変換するためのシステム開発と分光観測に必要なハードウェアの性能評価を行った。

3 システム開発

3.1 システム開発の内容

地上望遠鏡で観測して得られるスペクトルは観測地点、観測日時、天体の座標によって地球公転・自転運動の影響が変化するため、ドップラー効果による周波数偏移量もまた変化する。このため、常に同一の慣性系から観測される周波数、もしくは視線速度への変換が必要である。また、受信した電波強度から地球大気の影響を補正をする必要もある。そのため、分光観測したデータを天文研究で使用するために必要な横軸 LSR 速度 $V_{\text{LSR}}[\text{km/s}]$ 、縦軸フラックス密度 $S_\nu[\text{Jy}]$ (もしくはアンテナ温度 $T_{\text{A}}^*[\text{K}]$) へ変換するシステムを開発した。 V_{LSR} とは、周波数を特殊相対論的ドップラー効果の式 (12) を用いて速度へ変換し、地系ドップラー補正をして局所静止系 (LSR) における速度へと変換したものである。LSR とは、太陽近傍の星々が持つ平均的な銀河回転運動にのっているような仮想的な慣性系の事を指す。

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - (V/c)}{1 + (V/c)}} \quad (12)$$

ただし、 ν_0 は静止周波数、 c は光速である。

周波数 ν におけるフラックス密度 F_ν は、単位時間あたり単位面積を通過する電磁波のうち、周波数 $[\nu, \nu + d\nu]$ の範囲に含まれるエネルギーを $F_\nu d\nu$ として定義される。茨城 32m 電波望遠鏡のシステムでの出力データはフラックス密度ではなく、アンテナの開口能率が補正されていない観測フラックス密度 $[\text{Jy}]$ を出力するようにしている。これは、現時点では開口能率が決まっていないためである。 $[\text{Jy}]$ は $1\text{Jy} = 10^{-26}\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ で定義される単位である。

3.2 システムの処理の流れ

システムの処理の流れを図 4 に示す。

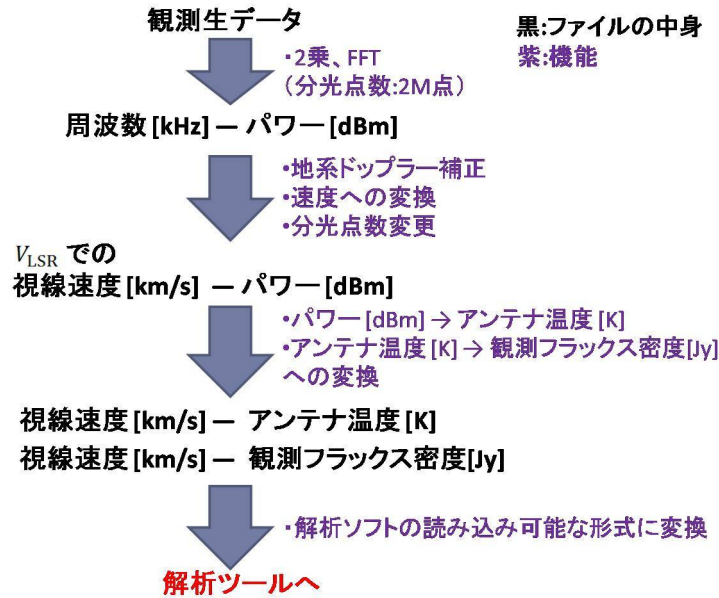


図 4: システムの処理の流れ図

ソフトによる各処理の流れは以下の通りである。

1. K5/VSSP32 から出力された生データをデータ処理用ソフト `speana2` を用いてパワースペクトルにする。
2. `a_parameter` で地系ドップラー速度の計算に必要なファイルを作成する。
3. `putftrkcal2_iba` で地系ドップラー速度を計算する。
4. `output` で横軸を視線速度に変換した後、地系ドップラー補正を行い V_{LSR} にする。また、この時に分解点数の変更も行う。
5. `anttemp`, `obsfluxdensity` でアンテナ温度あるいは観測フラックス密度への変換を行う。

3.3 地系ドップラー補正

観測した天体からの線スペクトルは、天体に対する観測者の運動によるドップラー効果の影響により、天体から本来放射されている静止周波数からずれている。よって、天体の LSR に対する視線速度を導出するためにはこの影響を補正しなけ

ればならない。この補正を地系ドップラー補正と呼ぶ。ドップラー効果の原因としては、

1. LSR に対する太陽の運動
2. 地心の太陽に対する運動 (公転)
3. 観測者の地心に対する運動 (自転)
4. LSR に対する天体の運動

があげられる。そのうち、4. に関しては観測中に時間的に変化しない天体固有の情報と考えられるため、補正する必要はない。残りの要素については天体の座標、観測時刻によって変化するので、計算機によって補正を行う必要がある。

3.4 各機能の内容

システムの各機能について説明する。現状では、これらの機能はスケジュールファイルによる自動観測モード (autoobs) で ON-OFF 観測を行う設定時のみに対応している。また、autoobs に使用するスケジュールファイルに記述する天体名は同一のものを含んではいけない。autoobs モードでは、サンプリング後の出力ファイル名に選択肢があるが、このシステムでは「sidDDDDHHMMSS.dat」を採用する。ここで、sid は局 ID (日立は H) で、それ以降は観測開始時の時刻。すなわち、DDD は通算日、HH は UT 時、MM は分、SS は秒である。

3.4.1 a_parameter

地系ドップラー補正の速度を計算するプログラム (putftrkcal2_iba) の実行に必要なファイル (*.prm) を作成する。このプログラムの実行には、事前に表 4 の実行パラメータを手動で編集したファイル (以下パラメータファイル) が必要である。パラメータファイル名は現状では「parameterfile.txt」を使用しているが、変更可能である。

3.4.2 putftrkcal2_iba

地系ドップラー補正の計算を行い、補正量をファイル (v1.txt) に出力する。このプログラムは a_parameter で作成されたファイル (*.prm) を必要とする。また、OFF 点、R については対となる ON 点観測時の時刻を採用して補正量を計算する。

要素	説明
VSSP32skdfile	分光計制御用スケジュールファイルの名前 (パス含む)
objectname	天体名
outputfile.prm	putftrkcal2_iba の実行に必要なファイルの名前 (パス含む)
0:normalyear,1:leapyear	観測年が平年 (0) か閏年 (1) か
0:HIT,1:TAK	観測局名 (0:日立, 1:高萩)
bandwidth[MHz]	分光計出力後の帯域幅 (サンプリング周波数の 1/2)
numberofch	speana2 実行後の分光点数 (2M 点か 2K 点)
1stLO[MHz]	最初の周波数変換時に混合した局部発振器の周波数
2ndLO[MHz]	2 段目の周波数変換時に混合した局部発振器の周波数
objectfrequency[GHz]	観測した天体の静止周波数
objectIF[MHz]	分光計入力時の静止周波数
transnumberofch->0:2048,1:4096,2:8192,3:16384,4:32768,5:2097152,6:nochange(2048)	分光点数変更後の点数
speana2.txt	speana2 実行後のスペクトルデータファイルの名前 (パス含む)
v1.txt	putftrkcal2_iba 実行後の地系ドップラー補正速度ファイルの名前 (パス含む)
ONorOFForR	ON, OFF, R の区分

表 4: parameterfile.txt の中身

要素	説明
DATE	観測日時 (年 月 日 時 分 秒) [UT]
SITE	観測望遠鏡
EPOCH	天体座標の元期
DFU_0CH	バックエンドの周波数下端 [kHz]
F_RES	周波数分解能 [kHz]
NLAG	分光点数
DCLO	最初の周波数変換時に混合した局部発振器の周波数 [kHz]
BBCLO	2 段目の周波数変換時に混合した局部発振器の周波数 [kHz]
FTRACK	観測天体の静止周波数 [kHz]
RAOJ	天体の赤緯 [時]
DECOJ	天体の赤緯 [度]
VLSR	天体の LSR 速度 (km/s)

表 5: **.prm の中身

3.4.3 output

K5/VSSP32 からの出力ファイルを視線速度に変換し、putftrkcal2_iba で求めた地系ドップラー補正量の補正を行う。しかし、現状では式 (12) を用いて視線速度への変更を行っておらず、 $V \ll c$ での近似式である式 (13) を用いている。

$$V = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} c, \quad (13)$$

ただし、 $\Delta\nu$ は静止周波数と観測周波数の差である。

その後、分光点数の変更を行う。分光点数の変更は、観測したデータを適当な速度分解能および取扱いやすい分光点数にするために必要である。茨城 32m 電波望遠鏡で必要とする速度分解能は ~ 0.01 [km/s] である。一方、K5/VSSP32 の設定可能な 2K 点分光と 2M 点分光の速度分解能は、6.7 GHz 帯、64 MHz サンプリングで、 ~ 0.7 [km/s] と ~ 0.00067 [km/s] である。このことから、目標とする速度分解能に対し、2K 点分光では足りず、2M 点分光では速度分解能が高すぎる事が

わかる。ただし、このソフトで分光点数を変更する場合、speana2 を実行するときに 2M 点分光を選択しなければならない。現在選択できる点数は、2048 点、4096 点、8192 点、16384 点、32768 点である。6.7 GHz 帯、64 MHz サンプリングのときの速度分解能は、それぞれ ~ 0.7 , ~ 0.35 , ~ 0.17 , ~ 0.087 , ~ 0.044 [km/s] となる。しかし、これではまだ目標とする速度分解能を達成できていないため、今後より多くの分光点数も選択できるようにプログラムの拡張が必要である。このプログラムはパラメータファイルを必要とする。出力ファイル名は、「YYDDDDHHMMSS_天体名 point(_分光点数).txt」である。ここで YY は観測年を、point は、ON 点、OFF 点、電波吸収体出力 (R) のいずれかの観測データにあたるかを示す。また、分光点数を変更したときのみファイル名の後ろに分光点数の値がつく。

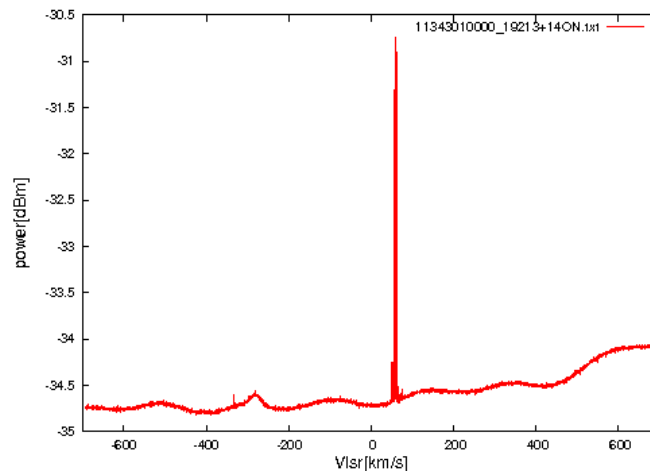


図 5: output 実行後の横軸を V_{LSR} に変換したスペクトル

ここで、分光点数の変更方法について説明する。分光点数の変更は 2M 点で分光したデータの強度を速度方向に複数チャンネル積分することで行う。積分するチャンネル数が、変更する分光点数を決める。また、分光データの各チャンネルの速度の値はチャンネルの中心速度を示しているため、チャンネル 1 の速度幅の半分はサンプリング後の帯域外の領域になっている。よって、変更前のデータを単純にチャンネル 1 から順にチャンネルを定数個積分することで分光点数を変更することはできない。

そこで、分光点数変更には次のような条件で積分を行う。

1. 速度の値がチャンネルの中心速度を示しているため、分光点数変更後の各チャンネルに対応する積分範囲の最初と最後にあたるチャンネルは、強度を半分にして積分する。
2. 積分するチャンネル数を合わせるために、分光点数変更後の分光データの最初にあたるチャンネルは、変更前の積分するチャンネル数を半分にしてから、積分した強度を 2 倍する。

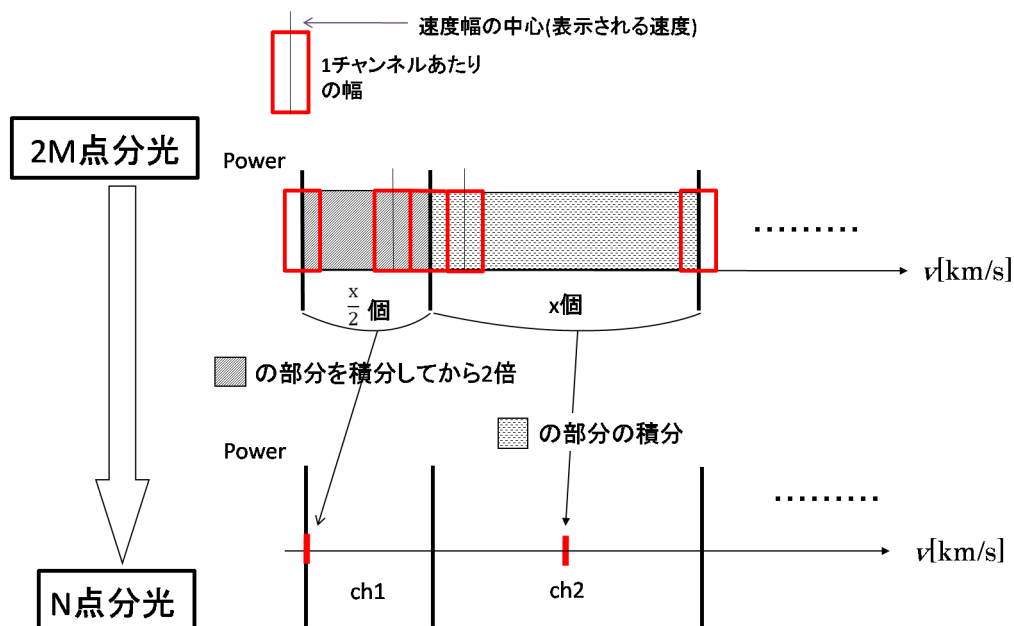


図 6: 分解点数変更の方法

3.4.4 anttemp

横軸を V_{LSR} に変換した ON 点、OFF 点、電波吸収体出力の分光データからそれぞれの測定時のアッテネータの値を補正した後、式 (7) を計算することで縦軸をアンテナ温度 T_{A}^* [K] に変換する。このプログラムは事前に表 6 の実行パラメータを手動で編集したパラメータファイルを必要とする。パラメータファイル名は現状では「antfile.txt」を使用しているが、変更可能である。出力ファイル名は、「YYDDDDHHMMSS_天体名_分光点数.txt」である。

要素	説明
temperature	T_{amb} 。絶対温度 [K] で書く
on_att[dB]	ON 点観測時のアッテネータの値 [dB]
off_att[dB]	OFF 点観測時のアッテネータの値 [dB]
R_att[dB]	電波吸収体出力観測時のアッテネータの値 [dB]
outputfile.txt	出力ファイル名
ON 点ファイルの名前 (パス含む) S OFF 点ファイルの名前 (パス含む) F 電波吸収体出力ファイルの名前 (パス含む) R	ON 点のファイル名と ON 点を示す記号 (S) OFF 点のファイル名と OFF 点を示す記号 (F) 電波吸収体出力のファイル名と R を示す記号 (R)

表 6: antfile.txt の中身

3.4.5 obsfluxdensity

横軸を V_{LSR} に変換した ON 点、OFF 点、電波吸収体出力の分光データを用いて、式 (14) を計算することで縦軸を観測フラックス密度 $S_\nu[\text{Jy}]$ に変換する。

$$S_\nu = \frac{2k}{A_p} T_A^*, \quad (14)$$

ただし、 A_p は、物理的アンテナ開口面積である。

使用法は `anttemp` と同様であるが、パラメータファイル名は「`fluxfile.txt`」である。出力ファイル名は、`anttemp` と同様である。

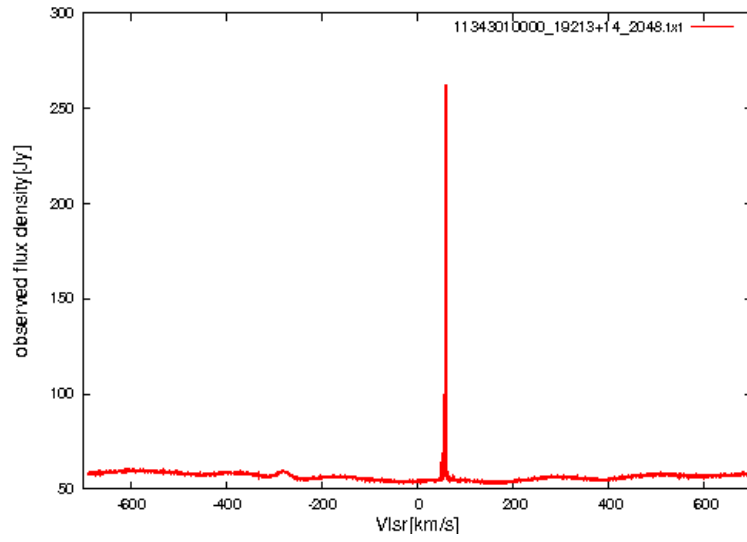


図 7: obsfluxdensity 実行後の観測フラックス密度に変換したスペクトル

ここまででデータ変換は終了する。さらに基本的な解析ソフトを作成したので説明する。

3.4.6 baseline

このソフトは下記の三種類を開発した。

- baseline1

スペクトルの両端のチャンネルを指定して 1 次式でベースラインを引く。

- baseline2

スペクトルの両端のチャンネルを指定して 2 次式でベースラインを引く。

- baseline3

スペクトルの両端のチャンネルを指定して 3 次式でベースラインを引く。

これらのソフトは、ベースラインとみなすチャンネル範囲の指定をプログラム実行中に対話的に入力する。また、実行時にベースラインを引くファイル名、出力ファイル名の順にコマンドライン引数を入力しなければならない。

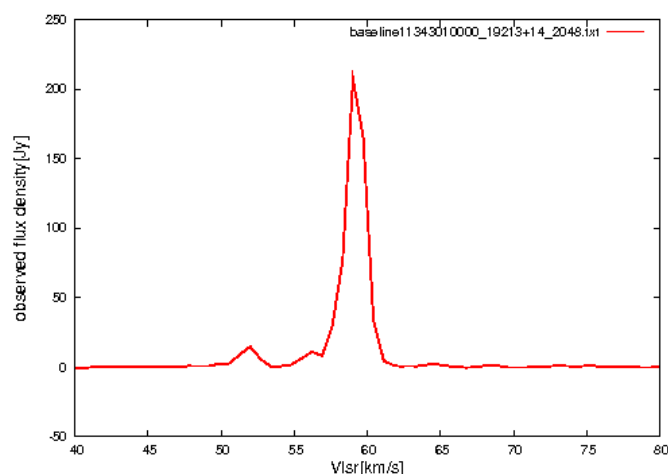


図 8: baseline3 実行後のベースラインを引いたスペクトル

3.4.7 integration

複数の観測ファイル入力に対し、パワーの時間平均を計算する。その際、初めに入力した観測ファイルの各速度を基準にしてその他の観測ファイルの速度とパワーを線形近似することで、初めに入力した観測ファイルの速度におけるパワー

の時間平均を計算している。これは、地系ドップラー補正を行うことで、観測ファイルによってチャンネルと速度の対応がずれることを補正している。入力する観測ファイルは、あらかじめ integfile.txt に名前 (パス含む) を一行ずつ書き出す必要がある。integration 実行時に integfile.txt、出力ファイル名の順にコマンドライン引数を入力しなければならない。

3.5 試験観測

このシステムの評価のため、国立天文台と山口大学が共同に運用している山口局と同時期に、メタノールメーザーの観測を行った。山口局のデータは、山口局で開発されたソフトを使用してスペクトルに変換した。日立局のデータは今回開発したソフトを使用してスペクトルに変換した。その後、得られたスペクトル同士を比較した。縦軸は、開口能率の値を補正してフラックス密度 [Jy] にした。

観測アンテナ	日立 (32m)	山口 (32m)
観測日	2011 年 9 月 30 日	2011 年 9 月 12 日-9 月 14 日
積分時間	60 秒	840 秒
偏波	RHCP	
分解能	~0.045 [km/s]	
観測周波数	6.668519 [GHz]	
観測法	ON-OFF 観測	
観測天体	G12.68-0.18(W33B)	
	18117-1753(W33A, G12.90-0.26)	
	18592+0108(W48, G35.20-1.74)	
	19213+1424(W51, G49.47-0.37)	

表 7: 観測諸元

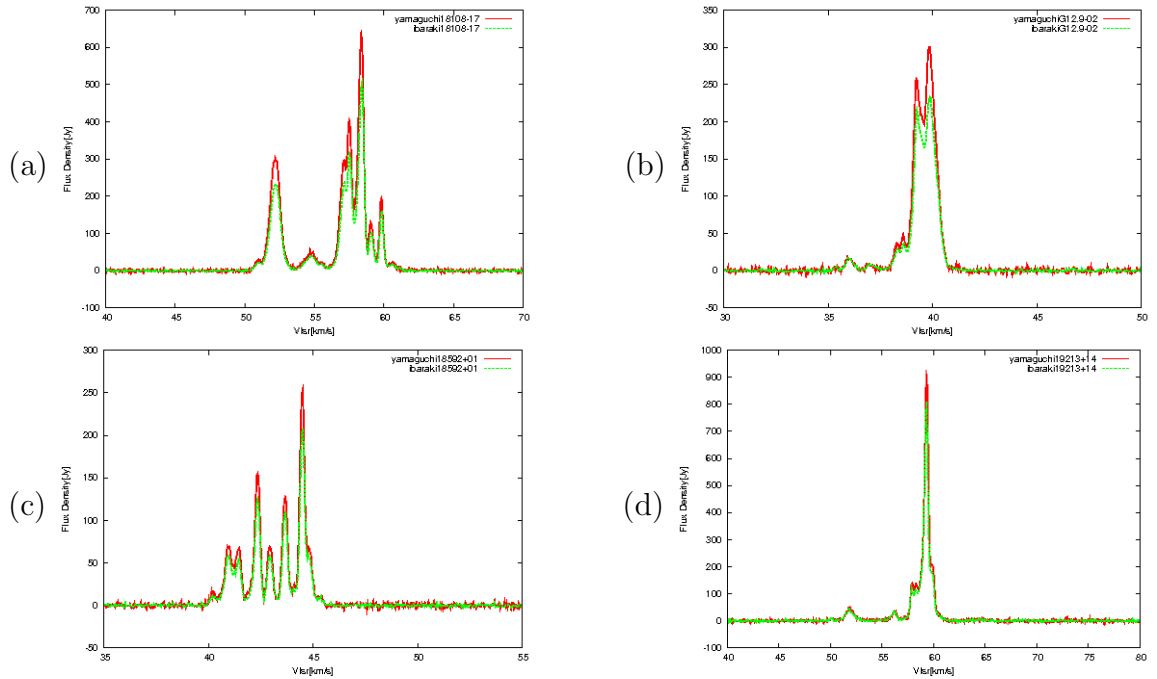


図 9:

- (a) G12.68-0.18(W33B) のスペクトル
- (b) 18117-1753(W33A, G12.90-0.26) のスペクトル
- (c) 18592+0108(W48, G35.20-1.74) のスペクトル
- (d) 19213+1424(W51, G49.47-0.37) のスペクトル

図 9 中の赤は山口局、緑は日立局で得られたスペクトルである。

試験観測の結果、スペクトルの形状と視線速度は山口局と一致した。このことから、地系ドップラー補正と取得したスペクトルの視線速度へ変換が正しいことが示された。ただし、強度については山口局に比べ茨城局が 20 % 程度小さいという結果が得られた。この原因として、まずポインティングのずれが考えられる。試験観測当時の茨城局のポインティングのずれは平均 0.49 arcmin、標準偏差が 0.72 arcmin で 6.7 GHz 帯のビームサイズ 4.6 arcmin と比較すると、受信強度が 20 % 程度低下する可能性がある。また、開口能率の測定精度に起因する誤差が ± 5 % 程度、山口局のポインティングのずれなどの誤差が 10 % 程度ある。したがって両者のずれはアンテナ部に原因があり、解析ソフトの問題ではないと考えることができる。

3.6 まとめ

茨城 32m 電波望遠鏡で分光観測を行うために観測システムの開発を行った。まず、サンプラー K5/VSSP32 で A/D 変換されたサンプリングデータを計算機へと転送し、データ処理用ソフトウェア群を用いてパワースペクトルへ変換する。その後、地系ドップラー補正と観測フラックス密度への変換を行い、 V_{LSR} に対応する観測フラックス密度を得るシステムを開発した。また、解析に使用できるベースラインを引くソフトやデータを時間平均するソフトも開発し、分光観測で天文研究を行える環境を整えた。

システムの評価のために試験観測を行い、山口局と比較したところ、スペクトルの形状や視線速度の値が一致することを確認した。強度については山口局より小さい値だったが、測定時のアンテナの追尾誤差で説明可能であり、解析ソフトの動作は正しいことが確認できたと考えられる。

3.7 今後の課題

今回開発したシステムは観測に必要最低限のものであり、今後詳細な解析をするためには、解析ツールの導入が必要となる。ALMA の単一鏡用解析ツールである CASA の利用を見据え、CASA が読み込み可能なデータフォーマットへの変換を行うソフトの開発が必要である。

4 ハードウェアの性能評価

4.1 K5/VSSP32 のリニアリティ測定と最適入力レベルの決定

装置には最適な入力信号強度範囲や扱える周波数範囲が決まっている。この範囲から外れてしまうと正確な測定ができない。入力信号強度の範囲を決定するためシステム全体のリニアリティ測定を行った。リニアリティとは、入力信号強度と出力信号強度の間に成り立つ線形関係のことで、装置に入力した信号強度と装置から出力された信号強度が正確に比例している場合をリニアリティがあるという。ここでは、K5/VSSP32 のリニアリティ測定を行い、リニアリティの確保できる範囲を求め、最適入力レベルを決定した。

4.1.1 測定方法

最適入力レベルを決定するため、次の2つの方法で測定を行った。1. は単一周波数信号入力時の出力周波数とリニアリティの確認、2. は天体信号受信時の最適入力レベルの決定のために行った。

1. 単一周波数信号を入力したときのリニアリティ測定を行った。信号発振器信号を K5/VSSP32 とパワーメーターに分配し、入力した。この時の入力信号の周波数はサンプリング後の帯域の中心付近にできるように設定した。信号発振器信号の強度を $-45\text{ dBm} \sim +20\text{ dBm}$ まで 1 dBm 刻みで変化させながらスペクトルを取得し、パワーメーターの値を記録しつつ、分光計での処理を行った (図 10)。

入力信号周波数:	16.6 MHz
分光計設定:	64 MHz サンプリング, 4 bit
積分時間:	1 秒

表 8: 単一周波数信号入力によるリニアリティ測定時の設定

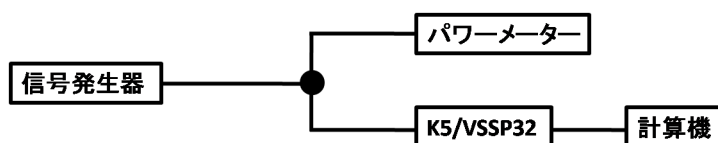


図 10: 単一周波数信号入力によるリニアリティ測定時の構成

2. 受信機出力を入力したときのリニアリティ測定を行った。電波吸収体を電波望遠鏡のビーム伝送系内に挿入した状態での受信機出力を、IF 系に挿入したアッテネータを介して K5/VSSP32 に入力した。アッテネータの減衰率を変化させる

ことにより、サンプラー入力信号強度を $-15 \text{ dBm} \sim +10 \text{ dBm}$ の範囲で 1 dB 刻みで変化させながら、スペクトルを取得した (図 11)。

使用アンテナ:	日立アンテナ
周波数設定:	1stLO 5900 MHz, 2ndLO 688 MHz(6.7 GHz 帯観測時の設定)
分光計設定:	64 MHz サンプリング, 4 bit
積分時間:	10 秒

表 9: 受信機出力を利用したリニアリティ測定時の設定

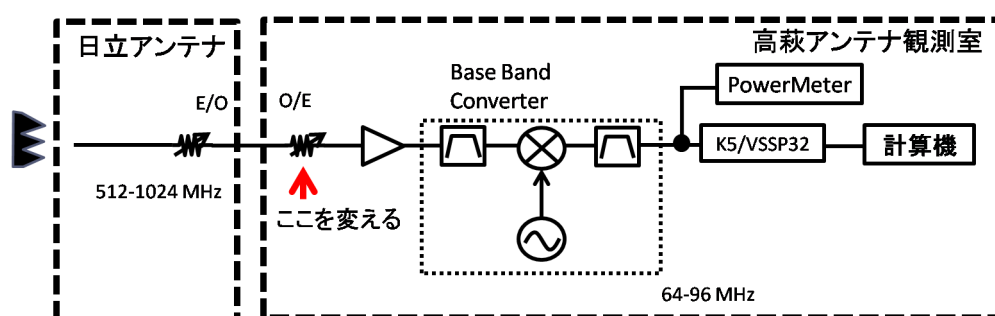


図 11: 受信機出力を利用したリニアリティ測定時の望遠鏡の構成

4.1.2 解析方法

それぞれの方法で得た測定結果の解析は以下のように行った。

1. の測定では、まず信号発生器の強度とパワーメーターの値の関係を調べ、測定系に用いている同軸ケーブル等による損失量を見積もった。その後、パワーメーターの値と K5/VSSP32 のピーク強度の関係を調べ、K5/VSSP32 の入力信号強度のリニアリティのある範囲を決定した。

2. の測定では、まずアッテネータの値と K5/VSSP32 への入力強度の対応付けをするために、Base Band Converter の後段にパワーメーターを接続し、分光計入力レベルを測定した。次に、リニアリティのある範囲を決定するために、下記手順で計算を行った。これは、アッテネータの表示が必ずしも正確でない事を補正するためである。 $A \text{ dBm}$ 入力時の分光データの各チャンネルの強度 $\{S_A[\text{dBm}](@n \text{ ch})\}$ からスケールングファクターを引き、さらに 0 dBm 入力時の各チャンネルの強度 $\{S_0[\text{dBm}](@n \text{ ch})\}$ を引く事によって残差の割合を求める [式 (15)]。ここで、スケールングファクターは、 $A \text{ dBm}$ 入力時および 0 dBm 入力時のパワーメーターで測定された強度 $x_A [\text{dBm}]$, $x_0 [\text{dBm}]$ の比 $(x_A - x_0 [\text{dBm}])$ である。

$$\text{残差の割合} = S_A - \{S_0 + (x_A - x_0)\} \quad (15)$$

その後、残差の割合を全チャンネルで平均し、入力強度と残差の割合の相関関係を調べることにより、リニアリティがどの入力強度の範囲にあるかを判定した。

4.1.3 結果

1. 単一周波数信号を入力したときのリニアリティ測定

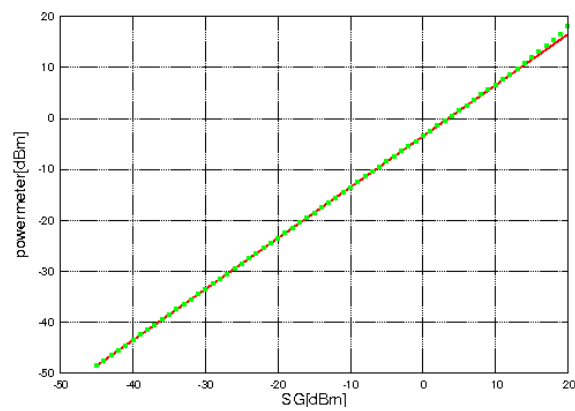


図 12: 信号発生器の強度に対するパワーメーターの強度

図 12 には傾き 1 の直線を示した。

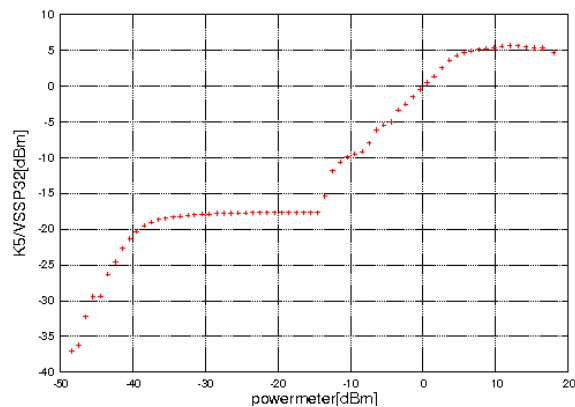


図 13: パワーメーターの強度に対する K5/VSSP32 のピーク強度

2. 受信機出力を入力したときのリニアリティ測定

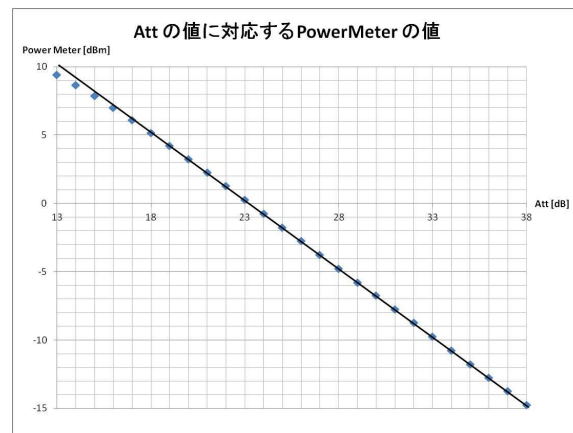


図 14: アッテネータの値に対応するパワーメーターの値

図 14 には傾き -1 の直線を示した。

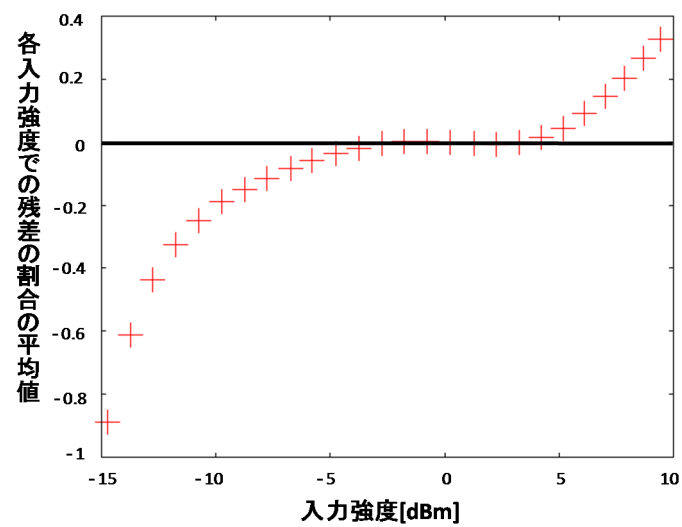


図 15: 入力強度に対する残差の割合の平均値のグラフ

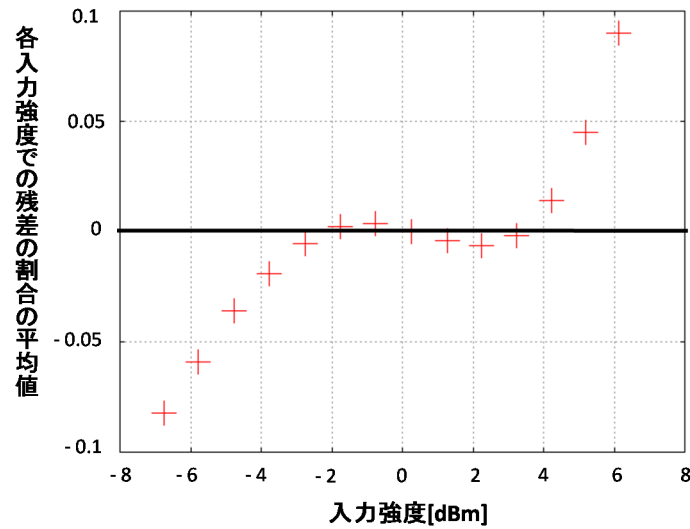


図 16: 入力強度 0 dBm 付近の拡大図

図 15、図 16 の縦軸はリニアスケールに直した。

4.1.4 考察

茨城 32m 電波望遠鏡で目標とする最適入力レベルのダイナミックレンジは、電波吸収体と sky の出力差 ~ 12 dB ($T_{\text{sys}} \sim 20$ K) を満たす範囲である。これを達成できれば T_{sys} 測定を含む観測時にアッテネータの調整をする必要がない。そのため、アッテネータの減衰率変更に伴う誤差による影響を受けずに済み、また解析時にアッテネータの値を補正しなくてもよくなる。

1. まず、K5/VSSP32 出力のピーク強度が入力した単一周波数信号と同一の周波数であることを確認した。これにより、K5/VSSP32 が正しく分光されていることが確認できた。次に、図 12 から単一周波数入力ではパワーメーターの強度が +10 dBm 付近以上になると、測定系に用いている同軸ケーブル等による損失が大きくなることがわかった。この範囲を除いて K5/VSSP32 のリニアリティのある範囲を図 13 から評価すると、リニアリティのある範囲が局所的であり、階段状のグラフになっていることがわかる。これは今回の測定に用いた量子化ビット数 (4 bit) では単一周波数信号を量子化するには階調数が足りないことが原因で起きている。階調数が足りないため、階調に対して適当な強度を入力しているときは入力強度に対応して強度が大きくなっていくが、階調と階調の間に信号がくるときは入力強度が大きくなってでも強度が変化しなくなっている。通常の分光観測では、ノイズに埋もれた天体信号を受信するため単一周波数信号のリニアリティを考慮するようなことはない。しかし、メーザーのバースト現象のような特定周波数で非常に強力な放射を出す天体を観測する場合には、単一周波数信号入力でのリニ

アリティを考慮する必要がある。したがって、今回の測定結果からメーザーのバースト現象など特別に強いラインを観測する場合、リニアリティがなくなる可能性があることがわかった。

2. 受信機出力での測定では茨城 32m 電波望遠鏡の目標となるダイナミックレンジを満たしつつ、残差の割合が最小になる入力強度の範囲は、 $-6 \text{ dBm} \sim +5 \text{ dBm}$ であり、このとき残差は $\sim 6 \%$ となった。ここで、リニアリティの判定条件はチョッパーホイール法の標準的な誤差 $10 - 15 \%$ より十分に小さいことである。そのため、今回の測定では残差が $\sim 5\%$ 程度になる範囲をリニアリティがあるとした。よって、残差が $\sim 5 \%$ 程度になる入力強度の範囲 $-5 \text{ dBm} \sim +5 \text{ dBm}$ をリニアリティのある範囲と決定した。この結果から、茨城 32m 電波望遠鏡の目標となるダイナミックレンジを満たすことはできなかった。しかし、これはアンテナを仰角方向に動かしたときの駆動範囲の上限と下限の強度差 $\sim 4 \text{ dB}$ より十分大きいため、観測時にアッテネータの調整をする必要が無いことを示している。また、電波吸収体出力測定時には、アッテネータを入れる事によって、リニアリティを確保している。

また、図 14 からパワーメーターの値が $+7 \text{ dBm}$ 付近より大きいところで線形性がなくなることがわかった。これは、アッテネータ直後のアンプのリニアリティがなくなっていることが原因であると考えられる。

4.2 観測システムの安定性測定

天体信号は微弱でかつノイズに埋もれて観測される。そのため、十分な信号雑音比 (S/N 比) を達成するためには長時間積分をする必要がある。積分をすることでランダムノイズの標準偏差は $1/\sqrt{t}$ に比例して小さくなるが、地球大気の変動及び受信機や分光計などの観測装置のゲイン変動が支配的になる時間スケールにおいては、S/N 比は必ずしも $1/\sqrt{t}$ に比例しない。そのため天体を観測する際には、ランダムノイズ以外の成分が支配するより短い時間内で ON-OFF のスイッチを行うことによりこれら装置起源のゆらぎを除去する必要がある。その頻度を決定するため、システム安定度の時間依存性に関する測定を行った。また、測定で得られたシステムの安定時間より十分短い時間スケールで ON-OFF 観測を行い、式 (16) の通り最小検出感度 T_{rms} が $1/\sqrt{t}$ で減少するか確認した。

$$T_{\text{rms}} = \frac{K_s T_{\text{sys}}}{\sqrt{Bt}}. \quad (16)$$

4.2.1 安定度の指標

システムの安定度を評価する際の指標にはアラン分散を用いる。アラン分散で評価されるのは、ランダムノイズに対して系統的なノイズがどの程度の時間で卓越してくるかである。

まず、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 $R_n(K)$ を作る。

$$R_n(K) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_{nK+i}, \quad (17)$$

ただし、 $M = \frac{N}{K} - 1$ として、 $n = 0, 1, 2, \dots, M$ である。

次に $R_n(K)$ に対して分散 $\sigma_A^2(K)$ を、式 (18) で定義する。この分散を、アラン分散と呼ぶ。

$$\sigma_A^2(K) = \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^M \{R_n(K) - R_{n-1}(K)\}^2. \quad (18)$$

これを K に対してプロットしたものをアランプロットという。ただし、縦軸・横軸ともにログスケールである。アランプロットはデータが時間に対してどの程度安定しているのかを測る指標になる。望遠鏡で取得した典型的なアランプロットは、図 17 のような形になる。ランダムノイズの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。

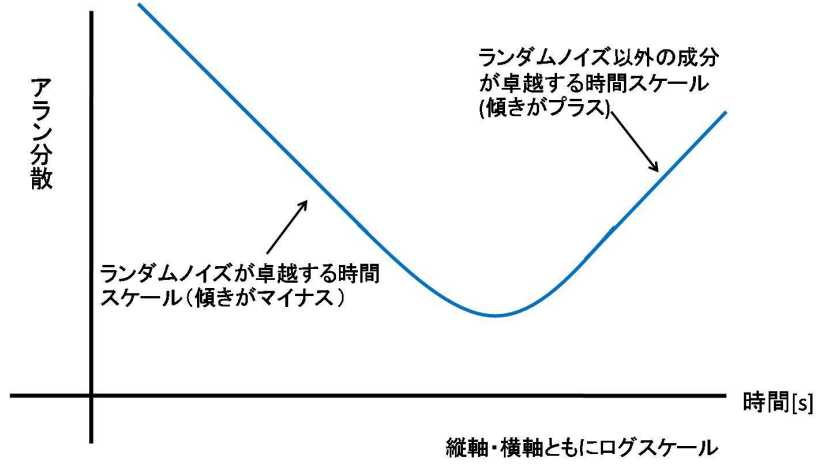


図 17: 典型的なアランプロット

電波分光観測では、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。そのため、あるチャンネルの出力強度に変動があっても、スペクトルの形が時間的に変動しなければ最終的に得られるスペクトルに影響はない。そこで、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のデータと、それとは別のチャンネルのデータ列のデータ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 $R'_n(K)$ を作る。

$$R'_n(K) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_{nK+i} - x'_{nK+i}), \quad (19)$$

ただし、 $M = \frac{N}{K} - 1, n = 0, 1, 2, \dots, M$ である。

次に、 $R'_n(K)$ に対して分散 $\sigma_A^2(K)$ を式 (20) で定義する。

$$\sigma_A^2(K) = \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^M \{R'_n(K) - R'_{n-1}(K)\}^2. \quad (20)$$

これを分光アラン分散という。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の卓越する時間スケールは、バンドキャラクタが安定である最大時間を意味している。

4.2.2 測定方法

システムが安定な時間スケールを測定するために、典型的な観測条件を与える天候下で、次の 4 通りについて K5/VSSP32 を用いて測定を行った。

- アンテナを大気の影響が最小である仰角 85 度に向けた状態
- アンテナを観測時の典型的な角度である仰角 30 度に向けた状態
- アンテナを観測で使用するおおよその下限で大気の影響を最も受ける仰角 15 度に向けた状態
- 大気の影響を取り除き、装置の安定度のみを測定する電波吸収体を電波望遠鏡のビーム伝送系内に挿入した状態

	85 度	30 度	15 度	電波吸収体出力
測定日時	2011 年 12 月 1 日	2011 年 10 月 17 日	2011 年 10 月 21 日	2011 年 11 月 2 日
天気	くもり	晴れ	くもり	くもり
Tsys	26K	25K	27K	26K
τ	0.01	0.01	0.01	0.01
使用アンテナ:	日立アンテナ			
観測時間:	8 時間			
RF 周波数:	6.652-6.684 GHz			
分光計設定:	64 MHz サンプリング, 4 bit, 2048 点分光			

測定したデータでアランプロットを作成し、それぞれの測定条件での安定時間を評価した。

4.2.3 結果

チャンネル 1010 番目の出力 (以下、ch1010 と表記) の絶対値と 7 組の 2 チャンネル間出力差 (ch1010-ch1110, ch910-1110, 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た。

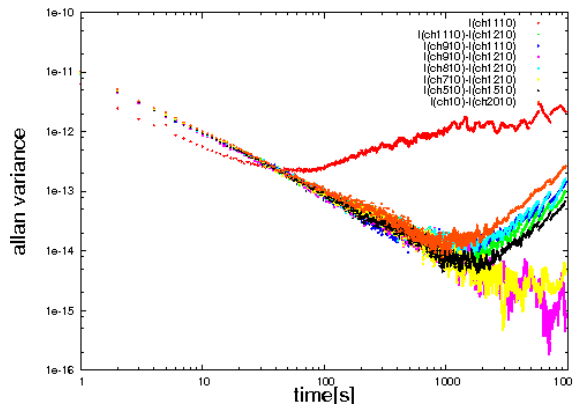


図 18: 仰角 85 度でのアランプロット

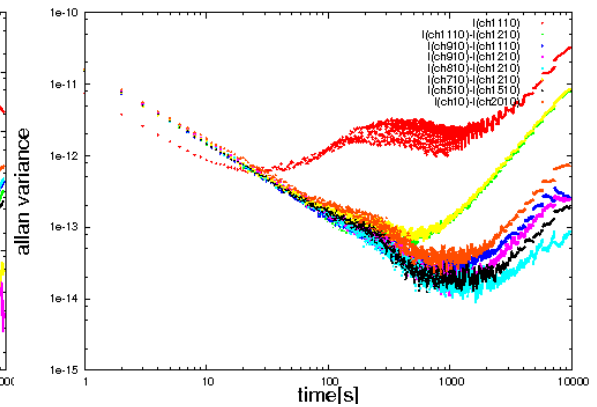


図 19: 仰角 30 度でのアランプロット

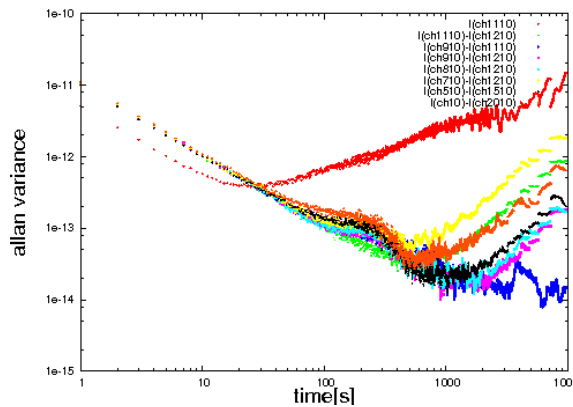


図 20: 仰角 15 度でのアランプロット

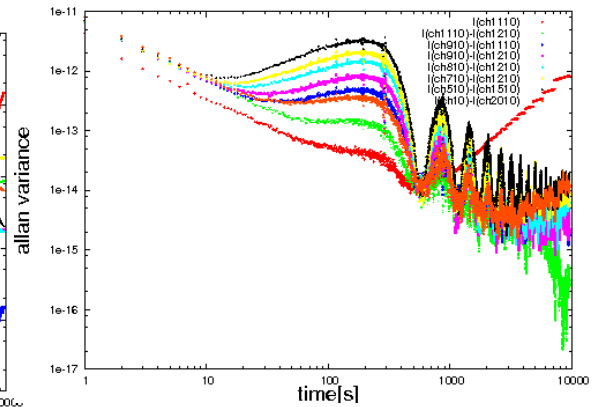


図 21: 電波吸収体出力でのアランプロット

電波吸収体出力でのアランプロットでは周期的な変動が見られ、安定時間を決定できなかった。この原因として考えられるものとして、デハイドの動作による給電ホーン上部膜の変形が考えられる。デハイドとは乾燥空気充填装置のことで、給電ホーンの防錆効果がある。茨城 32m 電波望遠鏡では、電波吸収体を給電ホーン上部膜の上に設置しているため、膜の変形による定在波発生状況の変化が影響したと考えられる。



図 22: 給電ホーン上部膜

そこで、給電ホーン内に乾燥空気を充填させた状態でデハイドを停止させ、充分時間が経った後、再度電波吸収体出力での測定を行った。

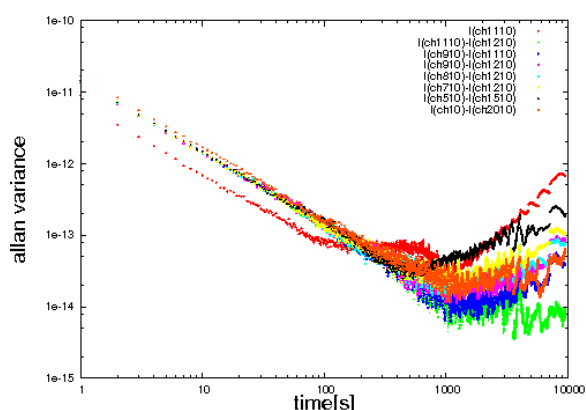


図 23: デハイド停止後の電波吸収体出力でのアランプロット

それぞれの安定時間を表 10 にまとめた。

	85 度	30 度	15 度	電波吸収体出力
絶対値の安定時間	20 秒程度	10 秒程度	10 秒程度	100 秒程度
2 ch 間の相対値の安定時間	900~1000 秒程度	400~900 秒程度	400~900 秒程度	600~1000 秒程度

表 10: 安定時間

分光アラン分散を計算をする際、選ぶチャンネルによっては安定時間が短くなってしまいうものがあつたため、安定時間に幅がある。

4.2.4 考察

絶対値の安定時間の下限値は、大気起源のゆらぎが最も大きいと考えられる仰角 15 度で 10 秒程度であった。これは、望遠鏡で観測される電力の絶対値に対する安定度に相当するので、周波数帯域内のパワーを測定する必要がある連続波観測に対する考察でこの指標を用いる。つまり、連続波観測をする場合 10 秒より十分短い時間内で ON-OFF スイッチを行わなければならないことが明らかになった。

2 ch 間の相対値の安定時間の下限値は、仰角 15 度で 400 秒程度であった。これは、バンドキャラクタの相対的な安定度を意味するので、線スペクトルに対応する分光観測での考察でこの指標を用いる。つまり、分光観測をする場合 400 秒より十分短い時間内で ON-OFF スイッチを行わなければならないことが明らかになった。

そこで、 $1/\sqrt{t}$ でノイズレベルが減少するかを実際に検証するため、上記で求めた 2 ch 間の相対値の安定時間より十分に短い時間スケールでメタノールメーザーの ON-OFF 観測を行った。今回行ったのは、(i) 確実にノイズが $1/\sqrt{t}$ で減少することが期待される 10 秒 ON 点、移動 15 秒、10 秒 OFF 点という順序での観測 (全観測時間に対する ON 点観測時間の割合 ~ 0.29) と (i) より観測効率のよい (ii) 60 秒 ON 点、移動 30 秒、60 秒 OFF 点という順序での観測 (全観測時間に対する ON 点観測時間の割合 ~ 0.4) である。解析はまず、式 (7) から T_A^* を求め、ベースラインを引き時間平均を計算した。その後、ベースライン領域での T_{rms} を求めて、積分時間に対する T_{rms} の時間依存性から、ログスケールで傾き $-\frac{1}{2}$ で T_{rms} が減少するかを確認した。

(i) 10 秒 ON - 15 秒移動 - 10 秒 OFF 観測

使用アンテナ:	日立アンテナ
観測天体:	19213+1424(W51, G49.47-0.37)
周波数設定:	32 MHz サンプリング、 4 bit
Tsys:	26 K
分光点数:	2048 点分光、 32768 点分光
τ :	0.01

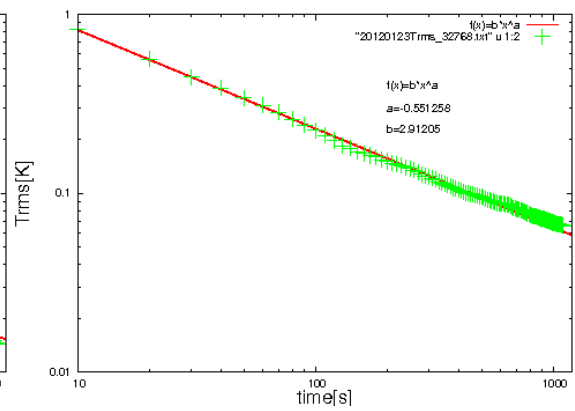
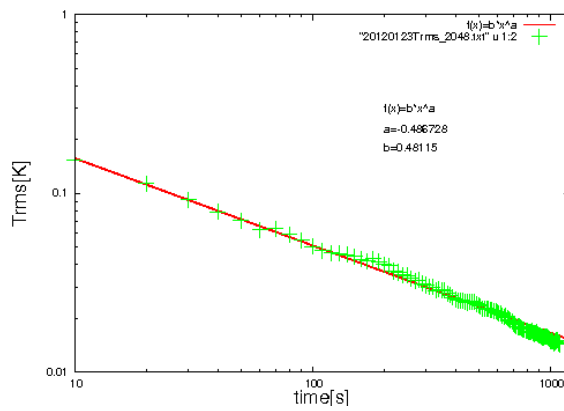


図 24: 10 秒 ON-OFF で 2048 点分光時の時間に対する T_{rms} のグラフ
 図 25: 10 秒 ON-OFF で 32768 点分光時の時間に対する T_{rms} のグラフ

図 24、図 25 中の赤は近似直線である。

図 24、図 25 から 10 秒 ON 点、15 秒移動、10 秒 OFF 点の観測では、 $1/\sqrt{t}$ でノイズが減少することが確認できた。

(ii) 60 秒 ON - 30 秒移動 - 60 秒 OFF

使用アンテナ:	日立アンテナ
観測天体:	19213+1424(W51, G49.47-0.37)
周波数設定:	64 MHz サンプリング、 4 bit
T _{sys} :	24 K
分光点数:	2048 点分光、 32768 点分光
τ :	0.01

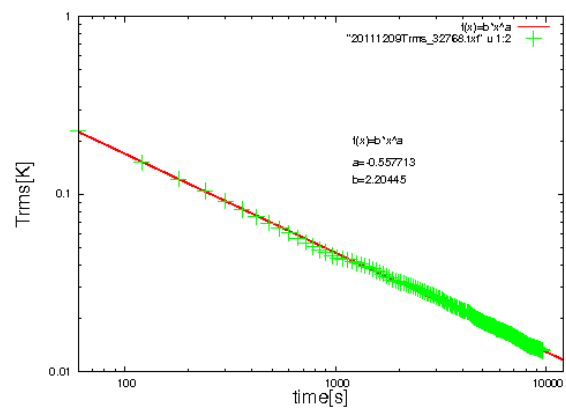
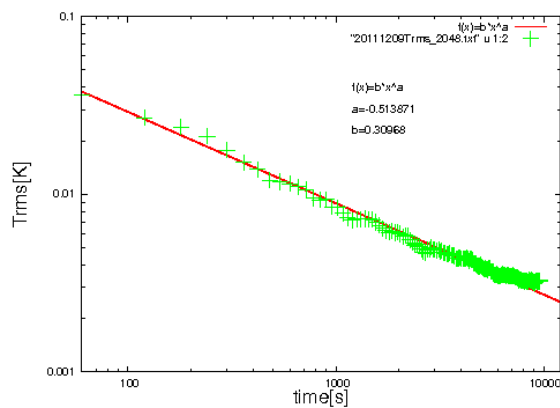


図 26: 60 秒 ON-OFF で 2048 点分光時の時間に対する T_{rms} のグラフ
図 27: 60 秒 ON-OFF で 32768 点分光時の時間に対する T_{rms} のグラフ

図 26、図 27 中の赤は近似直線である。

図 26、図 27 から 60 秒 ON 点、30 秒移動、60 秒 OFF 点の観測でも、 $1/\sqrt{t}$ でノイズが減少することが確認できた。

以上の結果から、通常の観測条件下では 60 秒ごとの ON-OFF スイッチでも積分時間の $-\frac{1}{2}$ 乗で相対的なノイズレベルが下がることがわかった。つまり、ノイズに埋もれた微弱な天体信号でも理論通りの感度で観測ができることが明らかになった。

また、これらの測定から ON-OFF 観測のデータを時間平均して ON 点積分時間を増やす際には、式 (7) を計算するときの電波吸収体出力の積分時間も増やさなければ、積分時間の $-\frac{1}{2}$ 乗で相対的なノイズレベルが下がらなくなることでもわかった。そこで、測定 (i)、測定 (ii) の観測データを用いて、相対的なノイズレベルが下がらなくなる ON 点積分時間と電波吸収体出力の積分時間との対応関係のわかるグラフを作成した。作成したグラフの電波吸収体出力積分時間は、10 秒、30 秒、1 分、3 分、10 分、20 分 (60 秒 ON-OFF は 19 分) である。

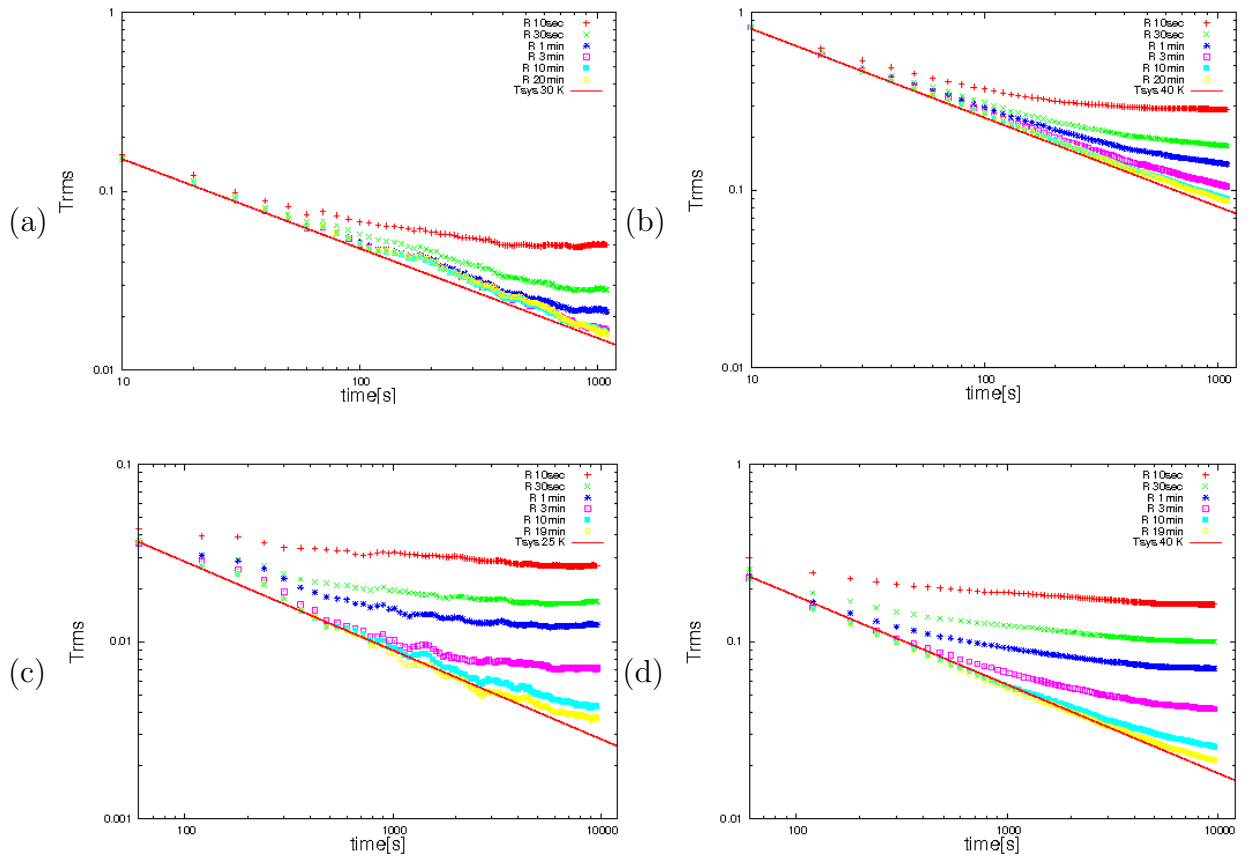


図 28:

- (a)10 秒 ON-OFF で 2048 点分光時の時間と電波吸収体出力積分時間の関係
- (b)10 秒 ON-OFF で 32768 点分光時の時間と電波吸収体出力積分時間の関係
- (c)60 秒 ON-OFF で 2048 点分光時の時間と電波吸収体出力積分時間の関係
- (d)60 秒 ON-OFF で 32768 点分光時の時間と電波吸収体出力積分時間の関係

図中の点は電波吸収体出力の積分時間に対応したプロットで、積分時間はそれぞれ、赤:10 秒、緑:30 秒、青:1 分、紫:3 分、水色:10 分、黄色:20 分 (60 秒 ON-OFF は 19 分) である。赤線は、ある T_{sys} での理論値である。

また、図 28 から 2048 点分光時の T_{sys} と R-sky 測定の T_{sys} はほぼ一致しているが、32768 点分光時の T_{sys} はそれよりも悪化していることがわかった。現状では、この原因・解決法について明らかになっていない。

4.3 まとめ

分光観測を行うため観測システムのハードウェアの性能評価を行った。

まず、リニアリティ測定を行い K5/VSSP32 への最適入力レベルが $-5 \text{ dBm} \sim +5 \text{ dBm}$ の範囲であることを明らかにした。ダイナミックレンジでは 11 dB で、アンテナを仰角方向に動かしたときの駆動範囲の上限と下限の強度差より十分に広い値を得られた。

次に、システムの安定度の測定を行い、ON-OFF スイッチ間の安定時間が、連続波観測では 10 秒 以内と非常に短いこと、分光観測では 400 秒 以内であることを明らかにした。また、実際に天体をアラン分散の測定によって求めた安定時間より十分に短い 60 秒 ON 点、移動 30 秒 、 60 秒 OFF 点を繰り返すことにより観測したところ、理論通り $1/\sqrt{t}$ でノイズが減少することが明らかになった。

4.4 今後の課題

まず、 32768 点分光時の T_{sys} が悪化する問題の原因を究明することが必要である。また、今回より長い時間での ON-OFF 観測を行い $1/\sqrt{t}$ でノイズが減少するかを確認することで、ON-OFF スイッチの周期を延ばし、観測効率を上げることが期待される。

5 まとめ

本研究では、単一鏡分光観測を行うために必要なシステム開発とハードウェアの性能評価を行った。システム開発によって分光観測結果を、科学的な解析に必要なフラックス密度を V_{LSR} の関数として表したスペクトルとして表示できるようになった。また、ハードウェアの性能評価により分光計への入力強度範囲の決定や ON-OFF 観測時の ON-OFF 切り替え間隔の最適値が明らかになった。これらのことにより、単一鏡分光観測を開始するために最低限必要な項目を整備する事ができた。したがって、今後茨城 32m 電波望遠鏡を用いた単一鏡分光観測を行い、天体現象の解明等で成果を挙げることが期待される。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にお世話になりました。

指導教員の百瀬宗武先生には研究テーマの選定から電波天文学や装置の基礎、論文執筆、研究の相談まで終始ご指導頂き心より感謝申し上げます。また、研究の進捗を気にかけてくださるなど研究しやすい環境に配慮して頂き、有難うございました。

米倉覚則先生には研究全般に渡って指導して頂きました。また、研究に行き詰まった時など辛抱強く話を聞いてくださり、的確な助言をして頂きました。有難うございました。

山口大学の皆様にはシステム開発や観測に関する事などで様々なご助言を頂きました。国立天文台の廣田朋也氏には有用なソフトを提供して頂きました。岡本美子先生にはゼミなどにおいて熱心にご指導頂きました。電波・赤外線天文学研究室の皆様とは共に考え研究を進めることでよい刺激を受け、充実した時間を過ごすことができました。皆様のご支援のおかげで本研究を行うことができました。有難うございました。

最後に、大学院への進学を賛成し、支えて下さった家族に深く感謝致します。

参考文献

- [1] シリーズ現代の天文学、宇宙の観測Ⅱ-電波天文学、2009 年、日本評論社
- [2] 星慶幸 修士論文 (茨城大学大学院理工学研究科自然機能科学専攻 2008 年度)
- [3] 藤沢健太、2010、「K5/VSSP32 + ライン観測システムのインストール」
<http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/kenta/etc/K5VSSP32-install.pdf>
- [4] 海田 他、2006、(東京学芸大学紀要自然科学系 58、131-149)
- [5] 秋里 他、2009、(東京学芸大学紀要自然科学系 61、63-71)