

修士学位論文

短基線広帯域干渉計システムの立ち上げと
それを用いた変動電波源モニター観測計画

2018年度
(平成30年度)

茨城大学大学院 理工学研究科

理学専攻
17NM152A
大島 理穂

★Abstract★

To observe the burst phenomena of AGNs and flare stars in the continuum emission with high precision and high temporal resolution, the effect of observed amplitude fluctuations due to earth's atmosphere and the receiver systems must be minimized. For this purpose, we are developing the Takahagi-Hitachi wide-bandwidth two-element interferometer. There are three merits for the Takahagi-Hitachi interferometer. (1) The effect of atmosphere and receivers can be removed by the interferometric observations. (2) By expanding the bandwidth wider, the sensitivity can be improved because the minimum detectable flux density will be reduced. (3) These antennas have large diameter, 32 m, and real-time processing can be done since the distance between the two antennas is very small (about 260 m). These telescopes are operated by the Ibaraki University, and thus frequent observations can be done.

In this system, the correlation is processed in real time after 3 bits sampling with the bandwidth of 512 MHz out of 6, 8 or 22 GHz RF frequency bands. The sampling rate is 1024M bps. The sensitivity is estimated to be about 1 mJy (5-sigma) for the observations at 8 GHz and the integration time of 10 min.

The removal of invalid data and the appraisal of SNRs are discussed to decide the way of the conversion from the output value to the flux density in this thesis. Firstly, I investigated the reason of the occurrence of the invalid data. The reason was not identified accurately, but it was solved now by adding absorbers for the noise inside the samplers and relocating the samplers from the receiver cabin to the observation room. Secondly, by measuring the auto correlations calculate while using a white noise as input signal, I calculated the SNRs as a function of the bit shift numbers which are used during the data processing in this correlator system. Then, I decided the optimum values of the numbers.

★ 論文要旨 ★

AGN などから到来する電波連続波の突発的な強度変動現象を高感度、高頻度かつ高い時間分解能で観測し、変動を捉えることがこの研究の目的である。本研究ではこれを実現できる高萩-日立広帯域二素子干渉計システムの立ち上げを進めた。

目的達成のために本システムが最適である理由は以下の三点である。一点目は、連続波の観測をするには干渉計が適していることである。連続波の単一鏡観測では大気や装置による影響を取り除くことが非常に困難である。しかし干渉計では大気や装置による影響が相関しないため、特に連続波観測に適している。二点目は、高感度な観測のためには広帯域にする必要があることである。高感度な観測は帯域幅を広くすることと積分時間を長くすることから実現できる。だが干渉計では位相差が時間変化するため積分時間を長くはできず、よって感度向上には広帯域化が必要である。三点目は、茨城大学で運用している高萩局、日立局を使用することである。これらの望遠鏡は大口径 32 m であり、望遠鏡間の距離は約 260 m であるためリアルタイムでのデータ伝送が可能である。さらに、茨城大学で運用しているため高頻度な観測が期待できる。

本システムの帯域幅は 512 MHz、サンプリングレートは 1024M bps、量子化ビット数は 3 bit である。観測周波数帯は 6 GHz、8 GHz、22 GHz の 3 つであり、8 GHz 帯の観測における 10 分観測の最小検出感度は 5σ で約 1 mJy が期待される。

この実現に現在必要なことは相関器の出力から実際の天体強度への変換方法を確立することである。強度が既知の 4 天体の観測を行ったところ、出力から実際の天体強度へ変換するための係数は 4 天体では 12 パーセントの精度で、3C123 を除く 3 天体では 5.6 パーセントの精度で、3C286 を除く 3 天体では 11 パーセントの精度で求まった。一方でこの結果では実際に観測できる精度ではない。天体強度は Ott et al. (1994) による結果を使用しているため変動している可能性も考えられる。よって、何等かの別の手段で測定する天体の強度を観測しながら同様の測定を行う必要がある。

さらに、本研究では発生していた異常の原因調査と、相関器の設定値による出力値の精度の評価を行った。

異常の原因調査では黒体観測やサンプラーへのノイズ対策の影響調査などを行ったが、観測数が少なくこれらの調査による原因の特定には至らなかった。一方でノイズを発していた本システム中のサンプラーの修理、サンプラーの設置位置の変更によって、この異常は解決されたと思われる。

設定値による出力値の精度の評価では、本相関器で必要な処理過程におけるビットシフト量の設定値によって、出力値にどのような影響が及ぶかを調べた。具体的には再量子化の前、出力前のビットシフト量の設定の違いによる誤差が、出力値にどう影響するかを SNR などの導出により解析した。その結果、実際の観測に必要なであろうアンテナのエレベーション変化や観測天体の強度差には十分対応可能な設定値を決定することができた。

目次

● 1 ●	序論：電波天文学	1
● 2 ●	研究目的	4
2.1	干渉計が連続波観測に適する理由	4
2.2	広帯域観測で最小検出感度を小さくする理由	6
2.3	茨城局について	7
● 3 ●	観測方法	9
3.1	干渉計の原理	9
3.2	観測装置	11
3.3	実際の測定手順	21
● 4 ●	測定 I. 解析方法の確立に向けて	23
4.1	相関結果の現状	23
4.2	異常発生の原因	32
4.3	本章のまとめ	34
● 5 ●	測定 II. 設定値の評価	35
5.1	設定値の調整 - 日立アンテナを用いて -	36
5.2	設定値の調整 - ホワイトノイズを用いて -	42
5.3	本章のまとめ	70
● 6 ●	まとめ	72
● 7 ●	今後の展望	73
Appendix A	関連プログラム一覧	A-1
Appendix B	作成プログラムのコード	A-2
Appendix C	異常データと α 導出のための異常データ除去方法	A-22
Appendix D	dmxcal による影響	A-30
Appendix E	異常の原因調査	A-33
E.1	黒体観測	A-33
E.2	サンプラーへの対策と異常発生頻度	A-40
Appendix F	卒業論文での測定結果	A-46

● 1 ● 序論：電波天文学

天文観測と聞いて一般にまず思い浮かぶものは可視光による観測だろう。綺麗に晴れた日の夜空は私たちにいくつもの星々を見せてくれる。この可視光は電磁波のうちおよそ 350 nm から 750 nm の波長を持つものである。図 1.1 のように、およそ 350 nm より短くなると紫外線、750 nm より長くなると赤外線と呼ばれる。

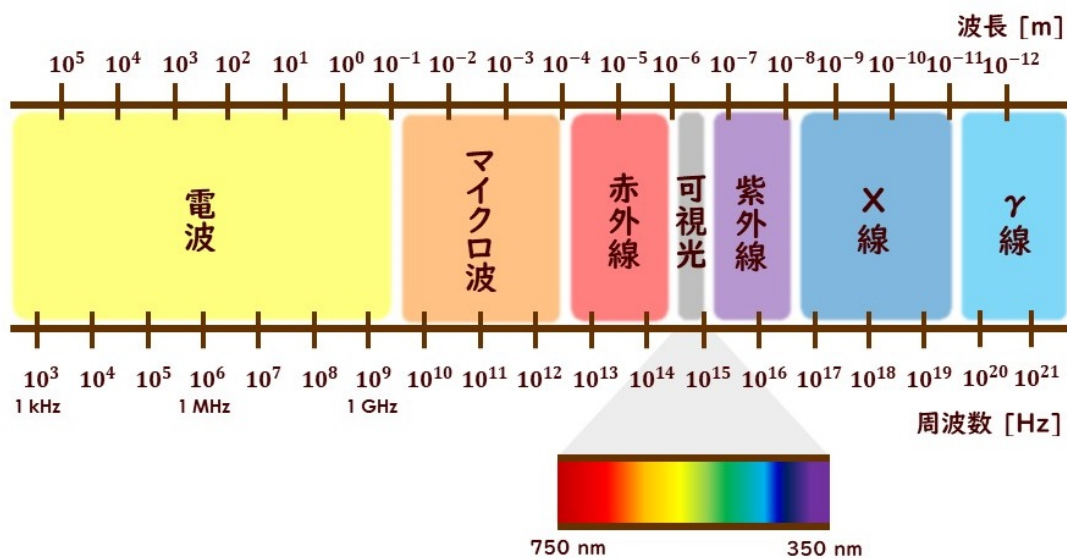


図 1.1: 電磁波の区分 (イメージ)

電波天文観測とは一般に思い浮かぶ可視光による観測ではなく「電波」による天文観測のことである。図 1.1 のとおり電波とはおよそ 1 mm 以上の波長をもつ電磁波の総称で、身近なところではテレビやラジオの放送に使用されている。

電波天文学のはじまりは 1932 年にアメリカの K.G. Jansky が空間の雑音観測のために作成されたアンテナ「メリーゴーランド」で飛行機のエンジンや雷などからではない正体不明の電波を発見したことに遡る。図 1.2 は大気の窓を示した図である。ここから分かるように電波は他の波長帯と比較して大気に吸収されにくく、地上で観測しやすい。よって大型の望遠鏡を作ることができ、可視光以外他波長と比較して早くから多く研究されてきた。さらに電波は波長が長いことから比較的扱いやすく、複数の望遠鏡で受信した電波を干渉させる技術も発展している。

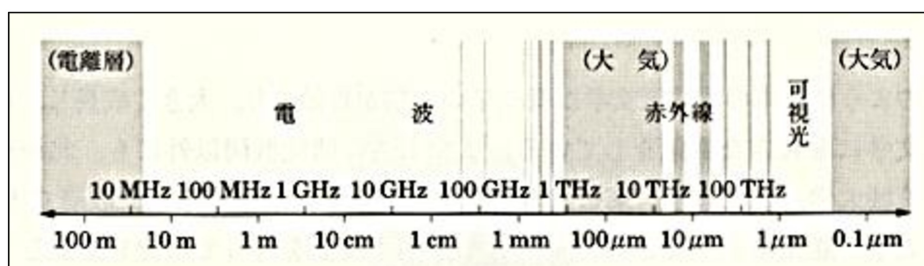


図 1.2: 大気の窓 白い領域が宇宙からの電磁波が地上まで届く波長域
(中井直也 ほか『宇宙の観測Ⅱ 電波天文学 シリーズ現代の天文学 第16巻』[8], p18)

電波天文学で観測対象となり得る天体は、必ずしも可視光とは一致しない。どの波長で強度が大きく観測されるかはその天体によって異なる。現在、茨城大学では 6.7 GHz メタノールメーザーのモニター観測を行っている。これは主に大質量星形成領域に付随すると考えられており、場合によっては熱運動する物体が周波数に対して持っているドップラー幅より狭い周波数に対して電波が観測されるような天体である。

本研究では、このように狭い周波数幅で電波を放射するような天体ではなく、広い周波数で電波を放射している電波連続波源を観測対象としている。その例として、以下のような天体が挙げられる。

●AGN

AGN とは、活動銀河核のことである。AGN の構造は以下の図 1.3 のようになっていると考えられており、このジェットの部分で電波で観測される。X 線でも多く観測されている天体である。



図 1.3: AGN の構造

フレア星

フレア星とは変光星の一種で、短時間で急激に増光を起こす星である。ここでは、EV Lac（とかげ座 EV 星）についての Osten et al., 2005 ([1]) に記載されている多波長観測による観測結果を示す。

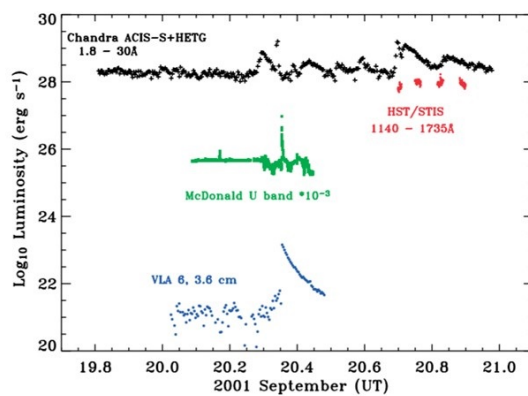


図 1.4: EV Lac の光度変動

黒が X 線、赤が紫外線、緑が可視光、青が電波による観測であり、横軸は時間になっている。多波長に渡ってあるひとつの増光現象を捉えられていることが分かる。

電波連続波観測によって、上記のような天体を感度よく観測できるようになる。多波長にわたる観測は、例えば AGN では構造中の異なる部分を見ることができる。

● 2 ● 研究目的

本研究の最終目的は、AGN や T タウリ型星、フレア星などから到来する電波連続波の強度変動現象を高感度、高頻度かつ高い時間分解能で観測し、変動を捉えることである。例えば突発的な変動を捉えることができれば、その現象が起きているサイズの上限を見積もることができる。これを達成するため、茨城大学が運用する 2 台の 32 m 電波望遠鏡を用いた高萩-日立広帯域二素子干渉計の立ち上げを行っている。

本章では、電波連続波の観測にはなぜ高萩-日立広帯域二素子干渉計が適しているかを述べる。

変動する電波連続波源のモニター観測のために高萩-日立広帯域二素子干渉計が最適である理由は、

- 干渉計であるため、連続波観測に適している
- 広帯域にすることで、最小検出感度を小さくできる
- 茨城大学で運用している高萩局と日立局を用いるため、大口径かつリアルタイムなデータ伝送と比較的自由な運用が可能である

という三点である。では、それぞれについて詳しく述べる。

2.1 干渉計が連続波観測に適する理由

前述のとおり、電波連続波を観測するには干渉計が適している。

一般的な電波観測では天体方向へアンテナを向けた測定である「ON 点観測」と、そこから少しずれた方向へアンテナを向けた測定である「OFF 点観測」を行う。ON 点観測では図 2.1 のように天体、装置、大気の影響が混ざった結果が得られる。OFF 点観測では装置と大気の影響が測定される。ON 点観測の結果から OFF 点観測の結果を「引き算」することで天体からの情報を取り出している。



図 2.1: ON・OFF 点で観測されるもの

実際には、装置や大気による影響は時間に対して一定ではない。よって後述のように正しい測定結果は得られない。だが、現在茨城大学行っている日立局を用いた 6.7 GHz メタノールメーザーのモニター観測では、ON 点観測の後に OFF 点観測をして、それらの結果から天体のみの情報を得る。これは、

観測対象のレーザーが輝線だからである。

まず、ON 点観測をしてから OFF 点観測までに装置や大気の状態がほとんど変化しなかった場合、図 2.2、図 2.3 のような結果が得られる。このとき図 2.4 が得られることは明らかだろう。ただ、図 2.5 を測定してから装置や大気の状態が変化し図 2.6 のようになった場合、ただ「引き算」をしてしまっただけでは図 2.4 は得られず、図 2.7 のようになってしまう。これでは天体成分だけを取り出せず、大気や装置の影響を多く含んでしまう。メタノールレーザーなど輝線の測定をする上で重要な部分はレーザー成分が記録されている図 2.8 の色付きで表されている部分である。よって、その他の部分の強度が無いと仮定しても問題ない。この仮定の下でベースラインフィッティングを行うことで、図 2.4 を導き出すことができる。

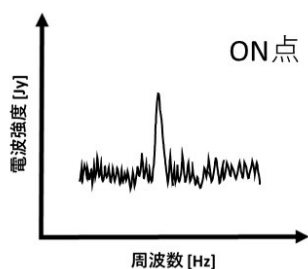


図 2.2: ON 点 (輝線)

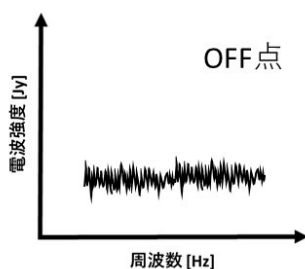


図 2.3: OFF 点 (輝線)

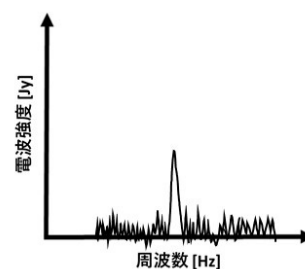


図 2.4: 結果 (輝線)

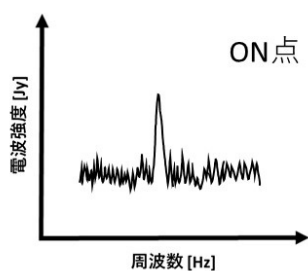
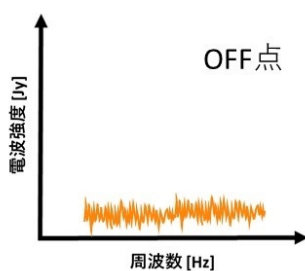
図 2.5: ON 点 (輝線)
(図 2.2 と同様)

図 2.6: 変化した OFF 点 (輝線)

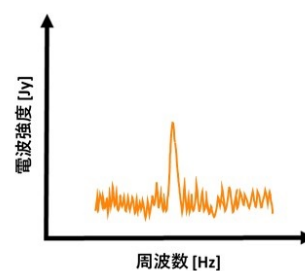


図 2.7: 不正確な結果 (輝線)

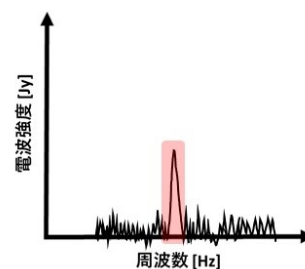


図 2.8: 必要な部分 (輝線)

しかし、連続波の観測ではベースラインフィッティングができない。連続波は狭い周波数幅で電波を放射するメーザーとは異なり、図 2.9 のように広い周波数幅で電波を放射している。よって、OFF 点の結果が変化すると正しい結果が得られなくなる。

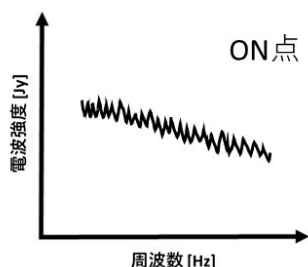


図 2.9: ON 点 (連続波)

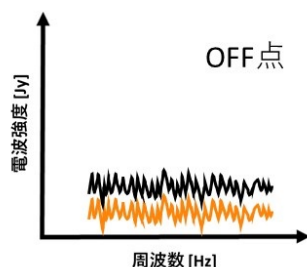


図 2.10: OFF 点 (連続波)

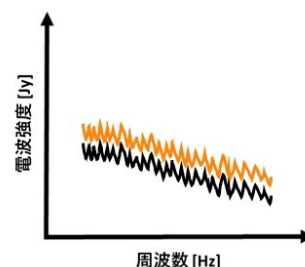


図 2.11: 結果 (連続波)

そこで便利なのが干渉計である。干渉計とは複数のアンテナを使用しその結果の相関をとる観測システムのことである（干渉計の詳細は §3.1 参照）。前述の通り、ON 点観測のときに得られる結果に含まれている情報は天体起因のもの、装置によるもの、大気によるものの 3 つに大きく分けられる。このうちの装置、大気による影響は使用するアンテナにより異なる。よって、例えば図 2.12 のようにアンテナ A とアンテナ B で同じ天体を観測した場合、得られる結果の中で等しいものは天体起因の部分だけになる。相関をとるということは似ている部分を取り出すことになるので、干渉計で同じ天体を観測することで天体起因の部分のみを取り出すことができる。つまり、単一鏡観測で観測結果から天体成分を取り出すには ON 点観測と OFF 点観測が必要であったが、干渉計では OFF 点観測なしで天体成分を取り出すことができる。

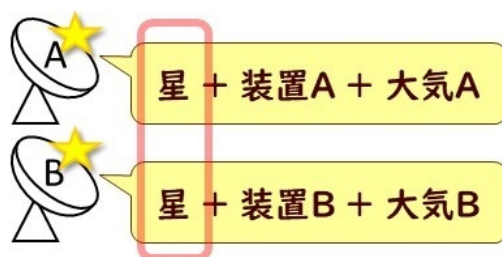


図 2.12: 複数のアンテナでの観測結果

以上から、ベースラインフィッティングができない連続波を、装置や大気によって電波が時間変動してしまう影響を受けずに観測するには複数のアンテナを使用してその相関をとる干渉計が適している。

2.2 広帯域観測で最小検出感度を小さくする理由

望遠鏡の最小検出感度を σ とすると、単一鏡の場合

$$\sigma = \frac{2kT_{\text{sys}}}{\eta A \sqrt{\Delta\nu\tau}} \quad (2.1)$$

ここで、
 k = ボルツマン定数 ($= 1.38 \times 10^{-23}$) [J K⁻¹]
 T_{sys} = システム雑音温度 [K]
 η = アンテナ開口能率 [無次元]
 A = アンテナ面積 [m²]
 $\Delta\nu$ = 帯域幅 [Hz]
 τ = 積分時間 [s]

と表される (干渉計では A や η が各局の相乗平均になる)。つまり、観測する周波数幅である帯域幅を広くすればするほど、積分時間を長くすればするほど、より強度の小さい天体まで観測できるようになる。

一方で、アンテナ間の位相差は時間変化する。干渉計では変化が少なくなるよう補正を行うが完全には無くせない。位相差を用いてベクトル積分を行うため、積分時間を長くすればするほど出力が小さくなりやすい。ゆえに位相の時間変化が無視できるくらい短い積分時間にする必要がある。本相関器では、今までの観測結果から現状最大でも 10 分程度が限界である。よって、干渉計観測で最小検出感度を小さくするには、帯域幅を広くすることが近道である。

2.3 茨城局について



図 2.13: 茨城局のアンテナ
手前が高萩局、奥が日立局

茨城大学で運用しているパラボラアンテナは、1 台が茨城県高萩市、1 台が茨城県日立市にある。以下、それぞれを高萩局、日立局と呼び、あわせて茨城局と呼ぶ。それぞれの局位置は、

表 1: 茨城局の各アンテナ位置 (田村良明, 2010, [7])

	日立	高萩
東経	140° 41' 32"	140° 41' 41"
北緯	36° 41' 51"	36° 41' 55"
標高	80 m	77 m

である。2 台のアンテナ間距離はおよそ 260 m である。前述の通り両局ともに直径は 32 m であり、この規模の巨大アンテナが約 260 m の近さに位置している環境は珍しい。アンテナ間は地下通路があり、そこに約 500 m の光ファイバーを通していている。茨城局を利用する利点のひとつは、直径 32 m の巨大アンテナ 2 台の観測データを、この光ファイバーを用いてリアルタイムに伝送可能なことである。リアルタイムなデータ伝送により、相関処理もリアルタイムで実行することができる。

また、茨城局では現在、以下の周波数帯での観測が可能である。

表 2: 茨城局受信機バンド幅

	受信機バンド幅 [GHz]
6 GHz 帯	6.3 – 7.0
8 GHz 帯	8.0 – 8.8
22 GHz 帯	21 - 25

主に 6 GHz 帯で 6.7 GHz メタノールメーザーを、22 GHz 帯で 22.2 GHz 水メーザーの観測を行っている。6.7 GHz メタノールメーザーについては日立局を用いてほぼ毎日モニター観測を行っている。このモニター観測の 1 日の観測時間はおよそ 13 時間である。こんなに多くの時間を使用できるのは茨城大学が茨城局を運用しているからである。比較的自由に運用可能なことも、高萩-日立を用いるメリットである。

● 3 ● 観測方法

本章ではまず干渉計の簡単な原理や種類を述べた後、本研究に使用する観測装置を紹介する。本論文の §5 では、主にこの観測装置の設定に関する測定について述べるため観測装置については詳しく説明する。

3.1 干渉計の原理

干渉計とは、複数の望遠鏡で同時に同一天体を観測し、受信した電波を相関させる仕組みのことである。

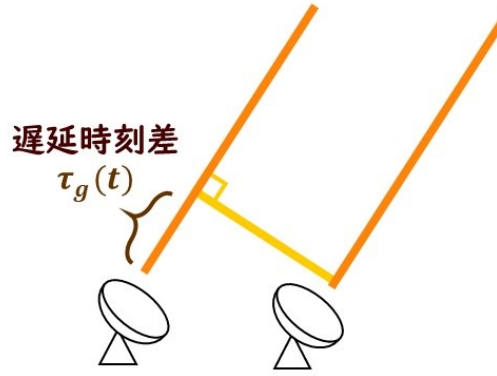


図 3.1: 2 台のアンテナ間の遅延時刻差

観測する天体は基本的に電波を球面波として放射すると考えられるが、天体と地球間の距離は非常に長いため我々のもとにやってくる電波は平面波と考えることができる。よって、例えば 2 台のアンテナで観測したとき、天体がある時刻に放射した電波は時間差で各アンテナに到達する（図 3.1）。この時間差を幾何学的遅延という。天体が見える方位角、仰角は時間とともに変化するため、この幾何学的遅延も時間変化する。

このことから、天体からの放射が $E(t) = E_0 \exp i(2\pi\nu_0 t)$ とすると、それぞれのアンテナでの受信信号はそれぞれ

$$V_1(t) = a_1 E_0 \exp i(2\pi\nu_0 t) \quad (3.1a)$$

$$V_2(t) = a_2 E_0 \exp i(2\pi\nu_0 (t - \tau_g)) \quad (3.1b)$$

と表せ、ここで、下付きの 1、2 はそれぞれのアンテナを表し、 a は振幅と位相を持つ、それぞれのアンテナのゲインである。 ν は観測周波数、 τ_g が幾何学的遅延である。

干渉計ではこの時間変化する幾何学的遅延の補正を行った後、相関をとる。遅延補正を τ_1 とすると遅延残差は $\tau = \tau_1 - \tau_g$ と表され、相互相関関数は

$$C_{1,2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t=-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V_1(t) V_2^*(t - \tau) dt \quad (3.2)$$

と表せる。相互相関関数は電圧の 2 乗であるため、パワーの次元を持つ。これを時間領域から周波数領域にフーリエ変換すると

$$\hat{C}_{1,2}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{1,2}(\tau) \exp(-2\pi i \nu \tau) d\tau \quad (3.3)$$

と表せる。これをクロスパワースペクトルという。干渉計では、主にこのクロスパワースペクトルが出力される。

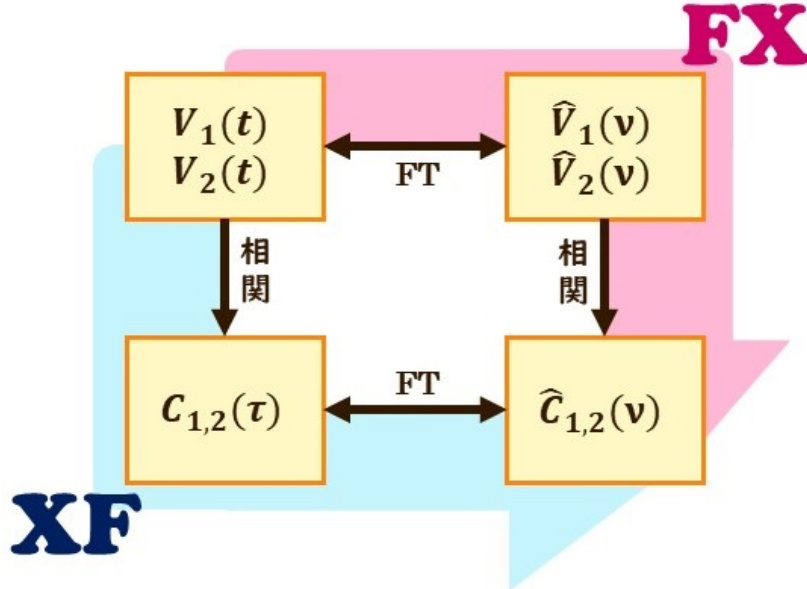


図 3.2: 入力から出力の流れ

上記のように相互相関関数を出力した後にフーリエ変換を行う相関器を XF 型相関器といい、これとは逆に受信信号を直接フーリエ変換してスペクトルを算出してからそれらの積をとりクロスパワースペ

クトルを導出する相関器を FX 型相関器という。これらは図 3.2 で表され、受信信号が左上で XF 型の場合は左下を、FX 型の場合は右上を通して出力が右下になる。

複数アンテナで受信した信号をひとつの相関器へとリアルタイム送りでリアルタイムで相関処理するものを結合素子型干渉計と言う。2 台のアンテナの場合特に二素子干渉計と呼ぶ。これはアンテナ間の距離が比較的短い場合に可能となり、本研究で立ち上げようとしている高萩-日立二素子干渉計もこのタイプである。アンテナ間の距離がケーブルで結べない程度に長い場合、リアルタイムでの相関処理をすることができず観測を終えた後にデータをハードディスクに記録させるなどして 1 か所に集めて相関処理をすることになる。このタイプはアンテナ間の距離である基線長が長い場合、主に VLBI (Very Long Baseline Interferometer) と呼ばれる。

3.2 観測装置

本研究で立ち上げる高萩-日立広帯域二素子干渉計のサンプラーと相関器はエレックス工業製のものを使用している。相関器はハードウェア型で、FX 型である。アンテナで天体信号を受信してから、式 3.3 に相当する結果が出力されるまでの大まかな流れが図 3.3 である。

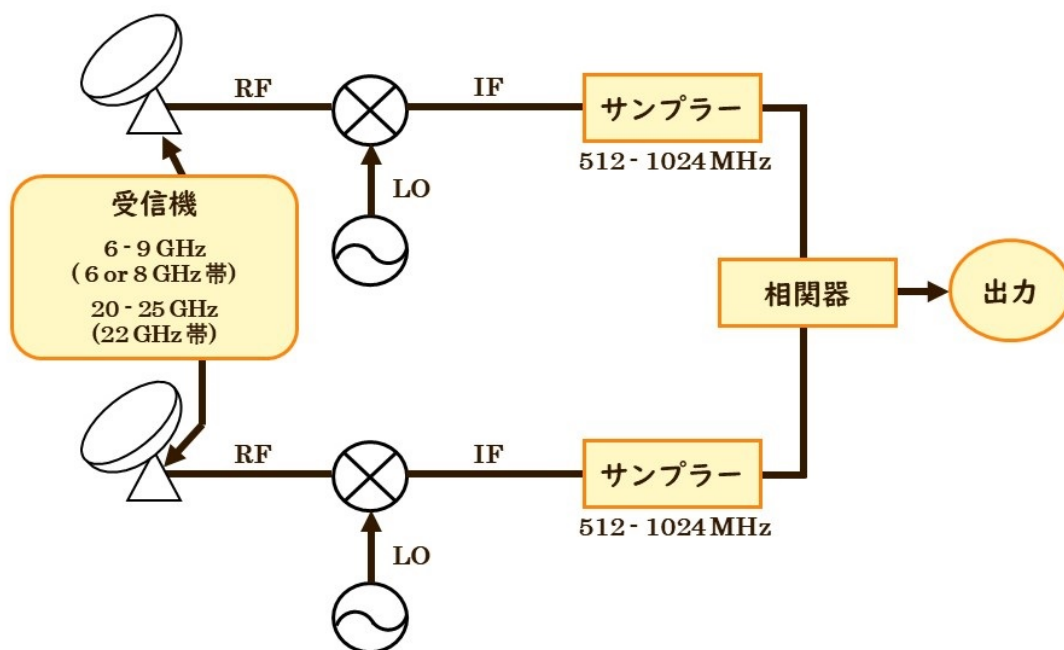


図 3.3: 観測装置

では、この流れに沿って詳細を説明する。

3.2.1 アンテナ

茨城局の望遠鏡は2台とも口径が32 mである。単純にアンテナ面積を計算すると約804 m²となる。これは物理的なアンテナ開口面積 $A[\text{m}^2]$ である。一方で、アンテナに電力密度 $W[\text{W}/\text{m}^2]$ のような電波が入ってきていると仮定すると、取り出せる電力 $P[\text{W}]$ は、 $P = AW$ ではなく

$$P = A_e W \quad (3.4)$$

となる。ここで $A_e[\text{m}^2]$ はアンテナの有効開口面積である。この A_e は、開口能率 η を用いて

$$A_e = \eta A \quad (3.5)$$

と表せる。 η はアンテナや観測周波数帯によって異なる、アンテナ仰角 El の関数となる。茨城局の開口能率は Yonekura et al., 2016([3]) に記載されており、数値としてはおおよそ0.6程度である。記載されている関数を表3に表す。

表3: 開口能率 (Yonekura et al., 2016, [3])

日立 6GHz LHCP	$7.51 \times 10^{-7} El^3 - 1.14 \times 10^{-4} El^2 + 2.75 \times 10^{-3} El + 0.718$
日立 6GHz RHCP	$5.56 \times 10^{-7} El^3 - 8.87 \times 10^{-5} El^2 + 2.27 \times 10^{-3} El + 0.706$
日立 8GHz LHCP	$1.38 \times 10^{-6} El^3 - 2.08 \times 10^{-4} El^2 + 6.22 \times 10^{-3} El + 0.658$
日立 8GHz RHCP	$1.06 \times 10^{-6} El^3 - 1.72 \times 10^{-4} El^2 + 4.99 \times 10^{-3} El + 0.670$
高萩 8GHz RHCP	$4.53 \times 10^{-7} El^3 - 8.13 \times 10^{-5} El^2 + 3.98 \times 10^{-3} El + 0.535$

開口能率は相関器の出力の後に補正している。相関器の出力を2015年度に茨城大学大学院を修了された加古琳一氏2015年度修士論文([10])に記されているプログラムにてdatファイルに変換した後のデータに、この開口能率を自動的に補正できるようcalcall.cというソフトを作成した。このソフトの説明をAppendix Aに、ソースコードをAppendix Bに示す。

表3のとおり高萩の開口能率は8GHzのRHCPのみ測定済みである。よってその他の観測周波数や偏波の観測の場合も、この開口能率の式によって補正している。

3.2.2 周波数変換

受信信号はアンテナから受信機を通った後、図 3.3 で LO(Local Oscillator) と表されている部分で RF(Radio Frequency) 信号 (天体の高周波信号) から IF(Intermediate Frequency) 信号 (中間周波数) に変換される。これは、低周波の信号の方が扱い易いからである。周波数変換の方法は、RF 信号に局部発振器による LO 信号を混ぜるヘテロダイン方式による。ヘテロダイン方式によって信号を混ぜると、その入力信号の乗乗の成分が出力となり、そのうち 1 乗の次に強い成分は 2 乗の成分である。つまり、 $\sin(2\pi f_{\text{RF}}t) + \sin(2\pi f_{\text{LO}}t)$ のべき乗の成分が出力される。ここでは、この 2 乗によって出てくる $\sin(2\pi f_{\text{RF}}t) \sin(2\pi f_{\text{LO}}t)$ を使用している。三角関数の加法定理を変形すると、

$$\sin(2\pi f_{\text{RF}}t) \sin(2\pi f_{\text{LO}}t) = \frac{\cos 2\pi(f_{\text{RF}} - f_{\text{LO}})t - \cos 2\pi(f_{\text{RF}} + f_{\text{LO}})t}{2} \quad (3.6)$$

という等式を導出できる。このことから、ある周波数 f_{RF} の RF 信号にある周波数 f_{LO} の LO 信号を混ぜると、 $f_{\text{RF}} - f_{\text{LO}}$ と、 $f_{\text{RF}} + f_{\text{LO}}$ の 2 つの周波数の信号が生成されることが分かる。このうち $f_{\text{RF}} + f_{\text{LO}}$ は高周波となる。本システムでは $f_{\text{RF}} - f_{\text{LO}}$ の成分を使用している。

では具体的な数値を用いて本システムの周波数変換の説明を行う。本研究における観測周波数幅は、6、8、22 GHz 帯のそれぞれにおいて表 4 の通りである。

表 4: 観測周波数

6 GHz帯	6600 – 7112 MHz
8 GHz帯	8192 – 9704 MHz
22 GHz帯	22023 – 22535 MHz

これらの周波数幅を 512 - 1024 MHz のベースバンドに変換しているため、例えば図 3.4 のような信号を混ぜることにより実現している。

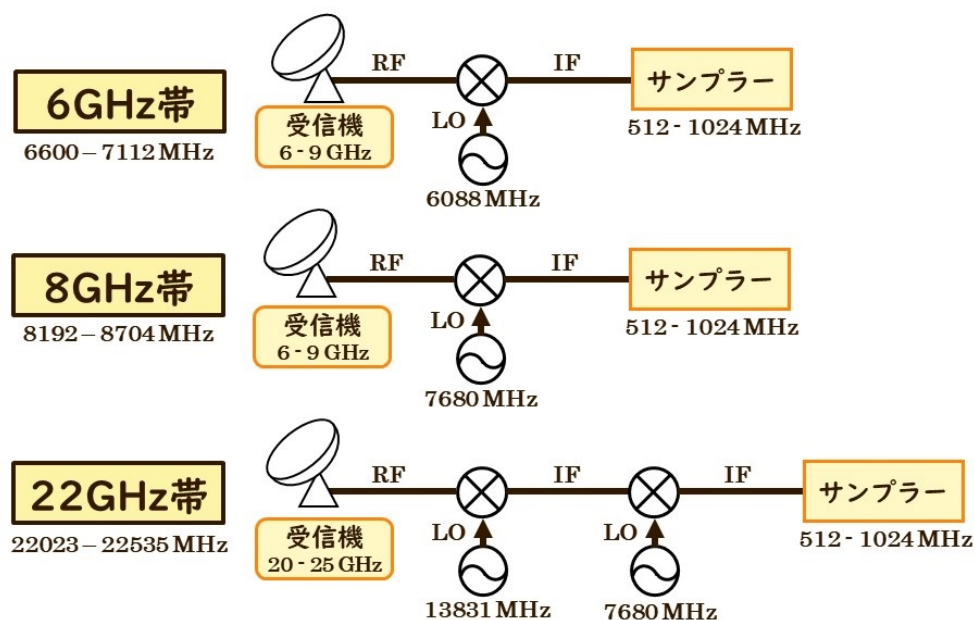


図 3.4: 周波数変換の実例

3.2.3 サンプラー

本観測装置では、周波数変換によって中間周波数 512 MHz - 1024 MHz に変換された信号がサンプラーに入る。サンプラーではアナログ信号をデジタル信号にする A/D 変換が行われる。本観測装置のサンプラーはエレックス工業製のものである。

A/D 変換では、アナログ信号を標本化 (sampling)、量子化 (quantization) することによりデジタルデータに変換している。そのイメージ図が図 3.5 である。どのくらいの時間間隔でデータを取得するかが標本化のサンプリングレートに値し、何段階に分けて電圧を表現するかが量子化に対応している。本サンプラーでは標本化を 1024 MHz、量子化を 3 bit、即ち $2^3 = 8$ 階調で行っている。

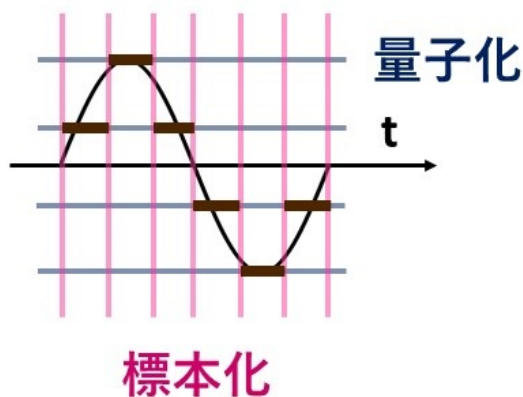


図 3.5: A/D 変換 (2 bit の場合の例)

この A/D 変換の際に注意すべき点は、量子化によって分けられた階調それぞれにどのくらいの割合でサンプルされた信号が割り当てられているかということである。この割合は入力信号 bit 分布と呼ばれ、そのイメージ図が図 3.6 である。例えばこの図 3.6 の場合、一番上と一番下の階調は 1 回、残り 2 つの階調は 2 回ずつデータが割り当てられている。このときの入力信号 bit 分布は図 3.6 の右側のように 17 : 33 : 33 : 17 となる。

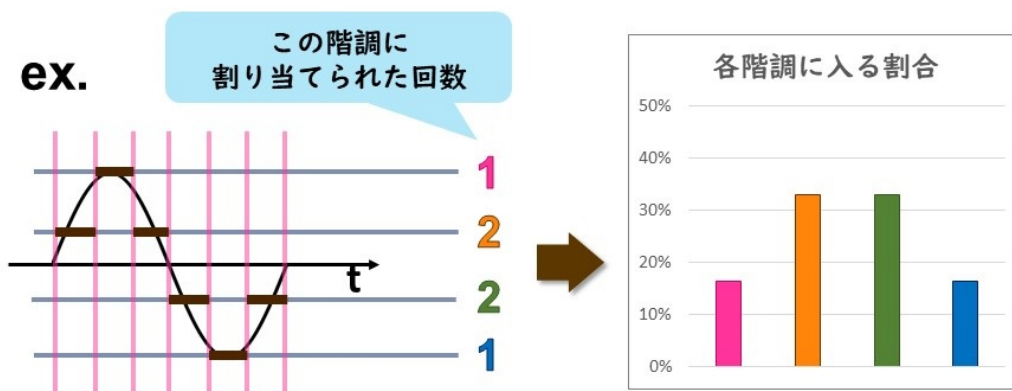


図 3.6: 入力信号 bit 分布

実際には、この分布は正規分布となるように調整するのが最適である (Thompson, 2004, p273, ([4])). 3 bit の量子化では 8 階調に分けるため、3 : 8 : 16 : 23 : 23 : 16 : 8 : 3 という分布が最適である。

この bit 分布は、どの振幅値に階調の区切りを設定するか、つまりスレシヨルドをどこにするのか決めることによって、或いは入力信号強度を変えることによって調整することができる。本システムでは入力信号強度をアッテネーターにより変えることでこの調整を行っている。

3.2.4 相関器

相関器もエレックス工業製のものを使用しており、FX 型ハードウェア相関器（図 3.7）である。相関器では、サンプラーでデジタル化されたデータに対して、図 3.8 のように FFT や相関、時間積分等の処理が行われる。

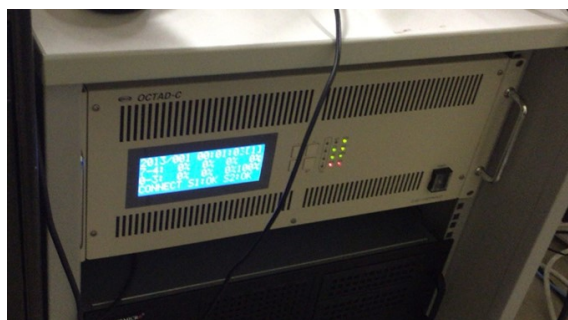


図 3.7: ハードウェア相関器

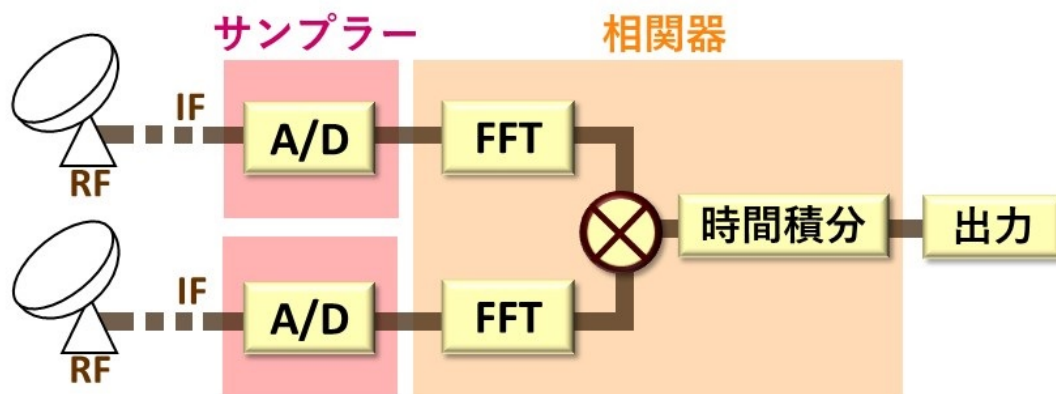


図 3.8: サンプラー、相関器における処理

まずは、FFT である。FFT とは高速フーリエ変換のことであり、FX 型である本相関器はここで先にフーリエ変換を行う。FFT はデジタルデータのフーリエ変換に値する離散フーリエ変換の対称性により演算回数を減らすことで高速にフーリエ変換するものである。一般的に DFT h_a は、離散化された信号を g_b と表すと

$$h_a = \sum_{b=0}^{N-1} g_b \exp(-2\pi i ab/N) \quad \text{for } 0 \leq a \leq N-1 \quad (3.7)$$

となる。ここで a 、 b 、 N は整数である。式 3.7 の場合、演算回数は N^2 回となる。これを奇数項と偶数項に分け続けることで演算回数を減らすのが FFT である。 $W_N = \exp(-2\pi i/N)$ とすると、

$$h_a = \sum_{b=0}^{N/2-1} g_{2b} W_N^{a(2b)} + \sum_{b=0}^{N/2-1} g_{2b+1} W_N^{a(2b+1)} \quad \text{for } 0 \leq a \leq N-1 \quad (3.8)$$

となる。式 3.8 では、 $2 \times (N/2)^2$ 回の演算でフーリエ変換が可能になる。この奇偶に分ける操作を $\sum$ がなくなるまで続けることで、もともと N^2 のオーダーの回数であった演算回数を $N \log_2 N$ のオーダーの回数に減らすことができる。

このように FFT がされた後、相関が取られる。それぞれの自己相関と、他の入力信号との相互相関がここで計算される。入力 は 4 つであるため、出力される相関結果は全部で 10 通りになる。この出力のそれぞれを、本相関器ではスレッドと呼んでいる。そして、相関を取った後にベクトルとして時間積分される。本相関器では 1.024 秒、或いは 0.1024 秒積分が可能である。

相関の結果、1.024 秒ごとに図 3.9 のようなスペクトルが出力される。10 通りすべてについてこのスペクトルは出力されるが、ここではそのうち 2 つある高萩の自己相関のうちの 1 つ、2 つある日立の自己相関のうちの 1 つ、それらの相互相関に対応する 3 つのスペクトルを載せる。これらのスペクトルは図 3.10 のように読む。

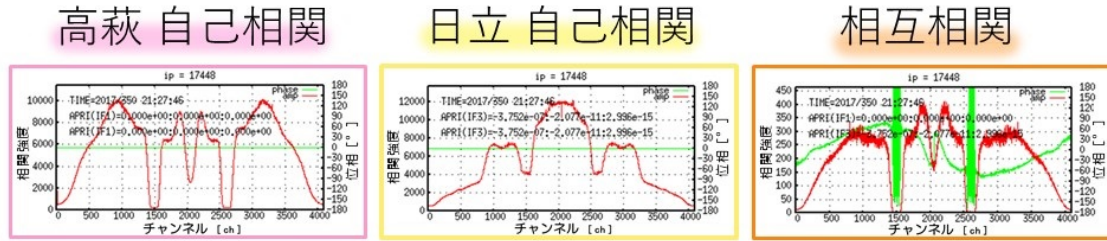


図 3.9: 出力されるスペクトル

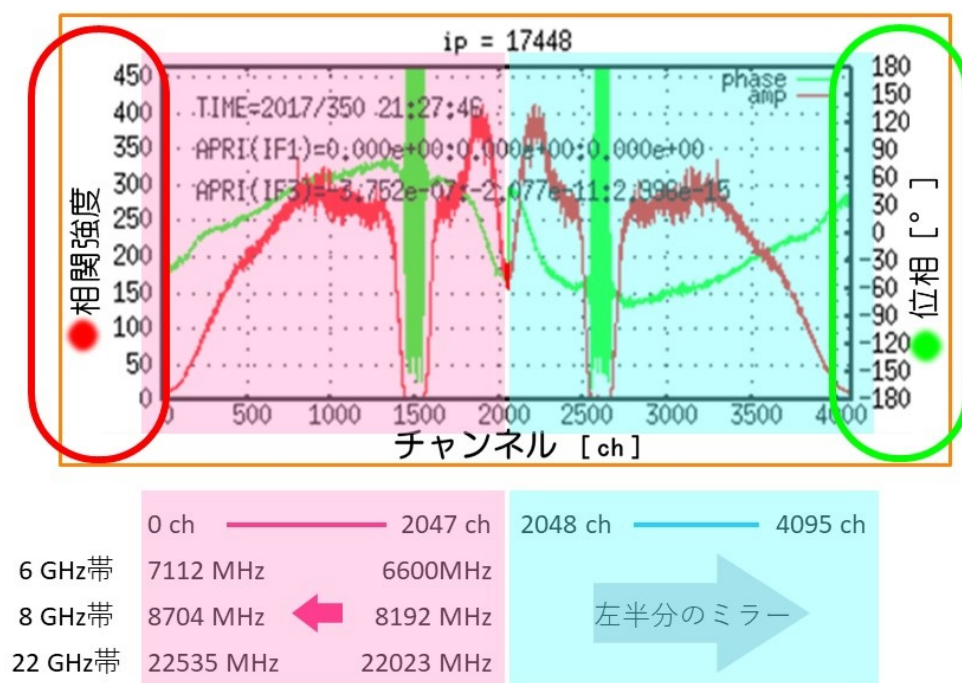


図 3.10: 出力されるスペクトルの読み方

3.2.5 各段階におけるデジタル信号のデータ量

以上が本システムの流れに沿った処理過程であるが、最後に各段階におけるデジタルデータのビット数について触れておく。サンプラーによってアナログ信号がデジタル信号に変換されるので、ここで触れるのは図 3.8 に示されている A/D 変換以降の部分である。

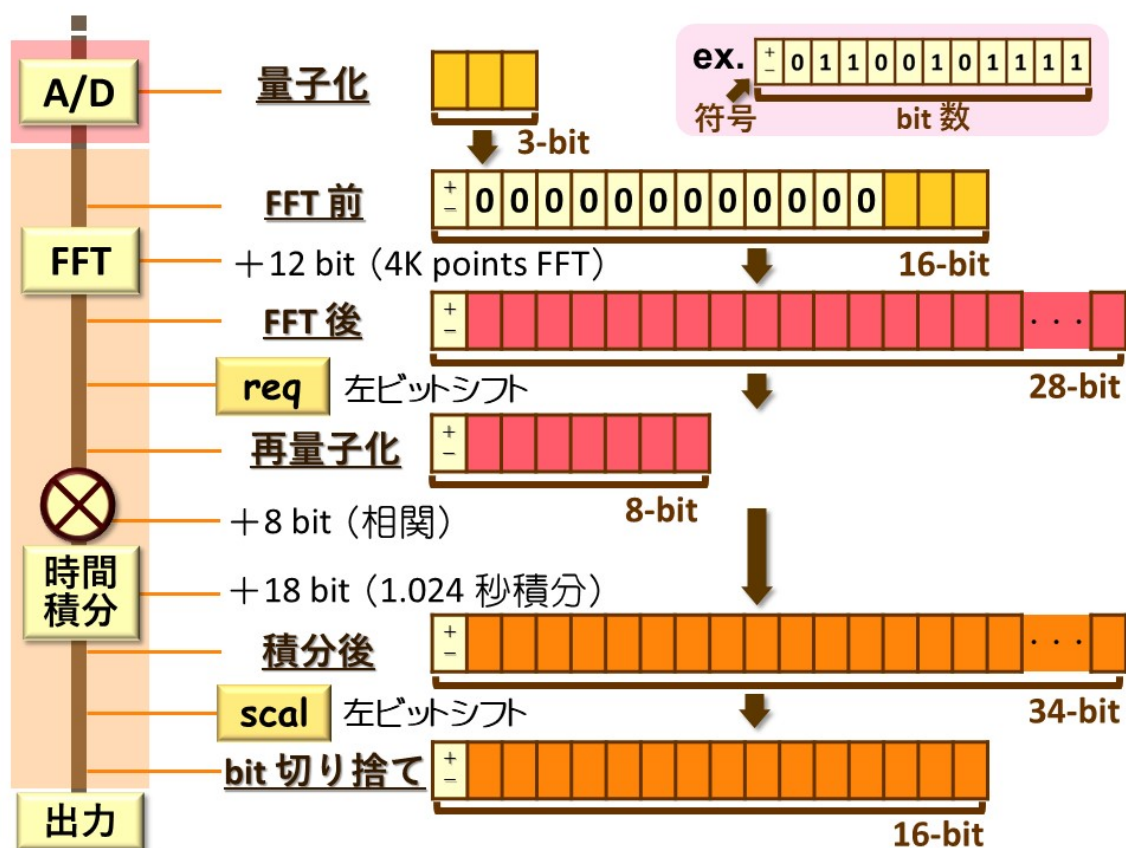


図 3.11: デジタル信号の流れ

図 3.11 がデジタル処理それぞれの過程におけるビット数である。本サンプラーは 3 bit で量子化を行う。少ない bit 数では FFT の演算が正確にできなくなるため FFT 演算前に実部・虚部を各 16 bit で表現する。FFT は 4K 点、つまり 4096 点で行うため、 $4096 = 2^{12}$ より FFT では 12 bit 増加する。そうして 28 bit になったデータは次に 8 bit に再量子化される。この再量子化では下位ビットを切り捨てするため、この直前に左にビットシフトを行う。本相関器では `set_requantization` という設定値がこのビットシフト数に対応する。以下、この設定値を“req”と表すこととする。このビットシフト数によって、図 3.12 のように再量子化でとってこられるデータが決まる。その後、相関によってデータ数は 2 倍の 16 bit になる。そして時間積分によって 18 bit 増える。これは 1024M bps でサンプリングされ 4K 点 FFT されたデータを 1.024 秒間積分する、つまり約 $250000 = 2^{18}$ 個のデータを積分するためである。もう少し詳しく書くと、1 点の FFT には

$$\frac{1}{1024M} [\text{sec}] \times 4096 = 4 \times 10^{-6} [\text{sec}] \quad (3.9)$$

の時間のデータが使用される。それを 1.024 秒積分するため、

$$\frac{1.024[\text{sec}]}{4 \times 10^{-6}[\text{sec}]} = 2^{18} \quad (3.10)$$

となり、 2^{18} 個のデータを積分することになる。以上の演算から 34 bit になったデータを図 3.12 と同じ方法で今度は 16 bit にして出力する。このときの左ビットシフト数も設定でき、set_scaling と呼んでいる。以下、この設定値は”scal” と表す。

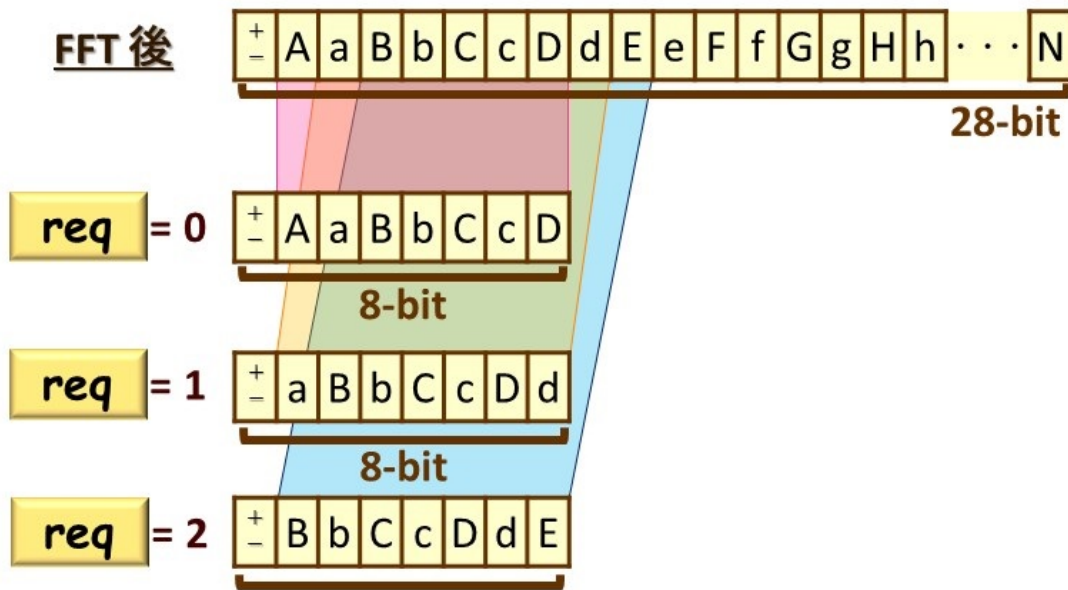


図 3.12: ビットシフト

これらをデータのフローと一緒に示したものが図 3.13 である。また、以上は本研究における測定で使った設定であるが、他に表 5 のような設定も可能である。

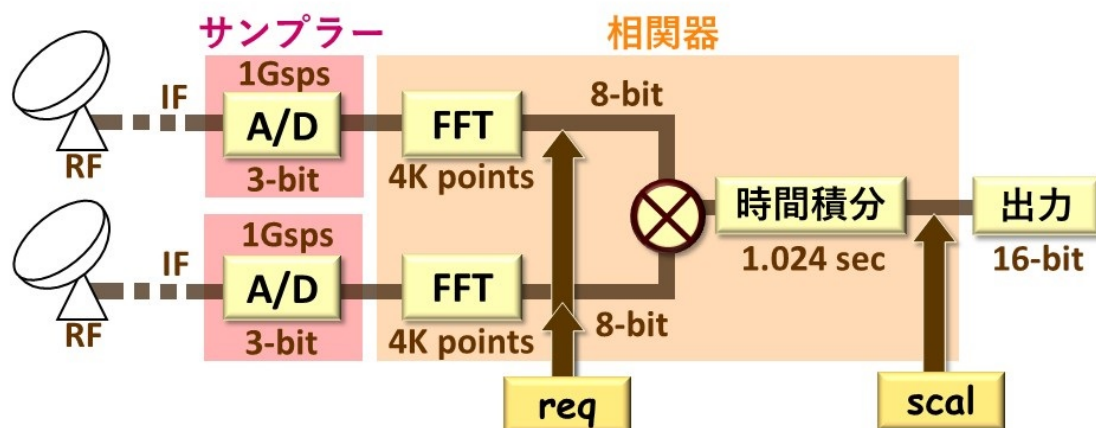


図 3.13: 処理過程のまとめ

表 5: 本相関器で可能な設定

サンプリングレート	1024M bps	2048M bps	4096M bps
FFT 点数	4K 点, 32K 点	4K 点	4K 点
FFT 後の再量子化	8 bit	8 bit	4 bit

3.3 実際の測定手順

測定内容に入る前に測定手順について簡単に紹介しておく。詳細は相関器マニュアルをご参照頂きたい。

まず、相関器の再起動後には、

- 相関器本体の日時の設定
- ネットワーク設定の反映

を行う。また、再起動をすると `set_requantization`、`set_scaling` の設定値も 0 になってしまうため必要に応じて

- `set_requantization` の反映
- `set_scaling` の反映

を行う必要がある。

次に、測定準備を始める前に

- アラーム、ステータスの確認
- demux のキャリブレーション (dmxcal)
- 1 pps の同期設定
- A/D 変換のオフセット設定
- 入力信号強度の調整

を行うべきである。

そして、測定に必要な準備が

- 遅延予測値のスケジュールファイル作成
- 相関処理開始時刻の設定

である。ひとつめは前述のとおり、図 3.1 のように干渉計観測では 2 つのアンテナ間に遅延時刻差が発生するために必要になる。天体が見える方位角、仰角は時間とともに変化するため遅延時刻差は時間変化する。本相関器では天体座標、アンテナ座標、日時からこの遅延時刻差の予測値として遅延予測値とその微分、二回微分が計算され、それらを 1.024 秒ごとに記載した遅延予測値転送用のスケジュールファイルによって反映されている。

準備が終わったら、

- 遅延予測値の転送予約
- 相関処理開始時刻の反映
- データ記録の予約

を測定の開始までに行う。これによって決めた時間に相関器を動かし、リアルタイムで観測結果を処理することができる。

相関開始後には遅延残差の設定をする必要がある。出力される相互相関スペクトルでチャンネルに対して位相が傾いていた場合、ある程度平らになるように手動で設定を決めて反映させる。

さらに、観測終了後には再度アラーム、ステータスの確認を行っている。

● 4 ● 測定 I. 解析方法の確立に向けて

本研究の最終目標は本装置を用いて電波連続波源のモニター観測を行うことである。相関器の出力はその設定などによって値が変化する。そのため、まずは相関器の出力から実際の強度への変換方法を確立する必要がある。

茨城大学大学院を 2015 年度に修了された加古琳一氏 2015 年度修士論文 ([10]) にて、この相関器を用いた数天体についての試験観測結果が述べられている。加古氏はバイナリーファイルである本相関器の出力を読み取るプログラム作成など、本相関器の利用を格段に便利なものへ変えた。一方で、本相関器を使用する変動電波源の観測に向けた、出力から実際の強度への変換方法の確立などのための測定は未だ殆ど為されていない。

本章では、その方法を確立すべく行った強度既知の天体の観測について §4.1 に述べる。また、この目的による観測のうちに見つかった、出力スペクトルに発生していた異常の原因を §4.2 に述べる (現在は解決済みである)。

4.1 相関結果の現状

前述のとおり、本研究の最終目標は本装置を用いた電波連続波源のモニター観測である。そのためには相関器の出力から実際の強度への変換方法を確立しなければならない。

これを調べるべく強度が既知かつ一定とされている 4 天体についての観測を行った。観測する 4 天体の強度の幅でリニアリティーが確保されていれば、定数 α を用いて

$$\text{フラックス密度 (文献値)} [\text{Jy}] = \alpha \times \text{相互相関強度 (出力値)} [\text{Jy}] \quad (4.1)$$

と表せるはずである。だが、茨城大学 2016 年度卒業の大島卒業論文に記載の結果 (Appendix F 参照) ではこのような比例関係は表せなかった。ここでは、2017 年 6 月 6 日から 6 月 13 日に行った、これに関連する観測結果を示す。これらには本章のはじめに述べたように異常なスペクトルが本観測中に多く混じっていたため、それらを除外して式 4.1 の α 導出を試みた。異常データを含む観測結果や異常データの除外方法は Appendix C に示す。

方法

強度既知の 4 天体、3C48、3C123、3C161、3C286 について 30 分間の測定をそれぞれ数回行った。観測諸元を表 6 に示す。今回の解析には 30 分以上の連続した観測結果のみを用いた。その観測一覧が表 7 である。

表 6: 強度既知天体についての観測諸元 (2017 年 6 月 6 日から 13 日にかけて)

アンテナ	高萩32m、日立32m
観測周波数	8192 – 8704 [MHz]
帯域幅	512 MHz
システム温度	～ 30 [K]
中間周波数	512 – 1024 [MHz]
サンプラー・ 相関器	エレックス工業製サンプラー、 FX型ハードウェア相関器 OCTAD-C
サンプルビット数	3 [bit]
サンプリングレート	1024 [Msamples / s]
観測期間	2017年6月9日 – 2017年6月13日
観測天体	3C48, 3C123, 3C161, 3C286

表 7: 強度既知天体の観測一覧 (2017 年 6 月 6 日から 13 日にかけて)

観測コード名	観測天体	観測開始時刻 (UT)
20170609c	3C123	2017y 160d 03h 50m 00s
20170610b	3C161	2017y 161d 02h 45m 00s
20170610j	3C161	2017y 161d 07h 15m 00s
20170610m	3C286	2017y 161d 09h 00m 00s
20170610r	3C286	2017y 161d 12h 00m 00s
20170611e	3C123	2017y 162d 01h 10m 00s
20170611f	3C48	2017y 162d 02h 05m 00s
20170611r	3C161	2017y 162d 07h 05m 00s
20170612f	3C48	2017y 163d 20h 13m 00s
20170612g	3C48	2017y 163d 20h 45m 00s
20170612j	3C48	2017y 163d 21h 32m 00s
20170612k	3C123	2017y 163d 22h 10m 00s
20170612l	3C123	2017y 163d 22h 44m 00s
20170613a	3C123	2017y 164d 00h 00m 00s
20170613f	3C286	2017y 164d 09h 10m 00s
20170613g	3C286	2017y 164d 09h 45m 00s
20170613i	3C286	2017y 164d 10h 25m 00s

この観測の出力は開口能率補正を行っており、前述の通り表 3 の式に基づくプログラム `calcall.c` (詳細は Appendix A 等を参照) を使用し計算している。相互相関強度は、高萩局、日立局の開口能率をそれぞれ η_T 、 η_H とすると

$$\text{相互相関強度} = \frac{\text{出力値}}{\sqrt{\eta_T \eta_H}} \quad (4.2)$$

のように補正を行っている。また、自己相関強度は開口能率 η を用いて

$$\text{自己相関強度} = \frac{\text{出力値}}{\eta} \quad (4.3)$$

の補正を行っている。この η は、高萩の場合には η_T 、日立の場合には η_H を用いる。このことから、以下に示す結果はアンテナ仰角による出力強度の変化は補正されていることになる。だが、自己相関強度の結果にはアンテナ仰角によって変化する大気の影響が含まれている。つまり、天体の強度が時間に対

して一定の場合、この補正を行った自己相関強度の結果は時間に対して一定である必要はない。一方で相互相関強度の結果が時間に対して一定となっている事は正常に観測が行われているということを示している。

結果

横軸を時間、縦軸を出力値のグラフを描いた結果が以下であり、天体ごとに纏めて観測日時がはやいものから順に示す。各局の自己相関強度は、見やすくするためすべて 10 分の 1 の値でプロットしており、高萩がグラフ中の桃色、日立が黄色に対応している。相互相関強度は橙色で、灰色は相互相関をとった際の位相差を示している。

また、以下の結果は前述の異常スペクトルによる異常なデータを省いた結果である。前述のとおり異常スペクトルの除外方法と異常スペクトルを含んでいる結果などは Appendix C に記す。

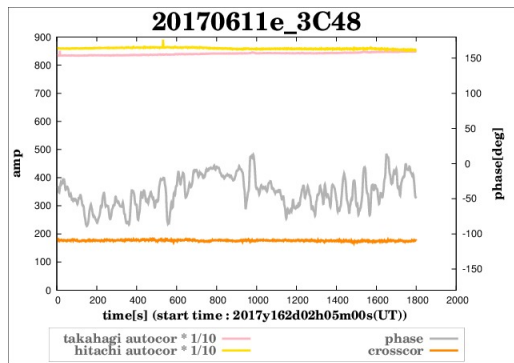


図 4.1: 3C48(20170611f)

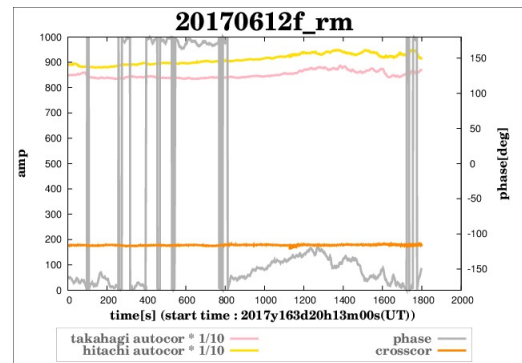


図 4.2: 3C48(20170612f)

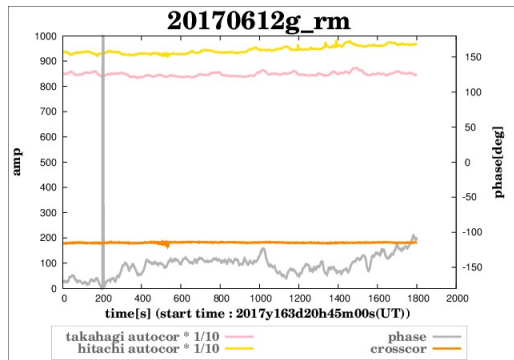


図 4.3: 3C48(20170612g)

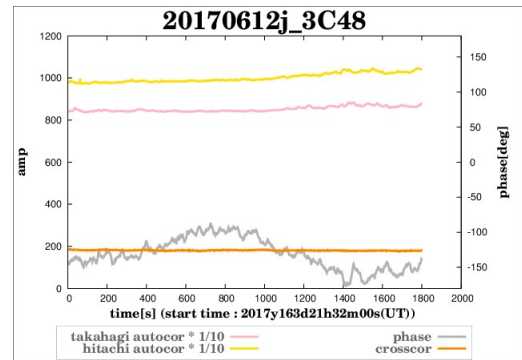


図 4.4: 3C48(20170612j)

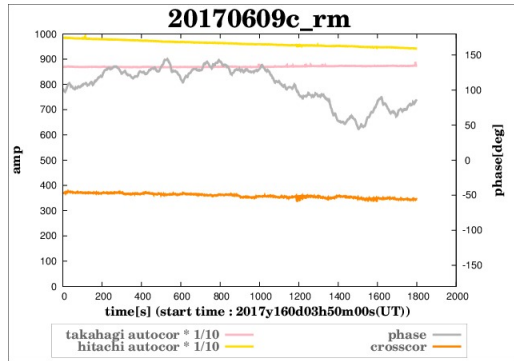


図 4.5: 3C123(20170609c)

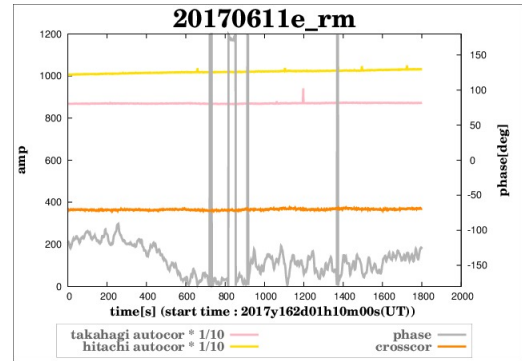


図 4.6: 3C123(20170611e)

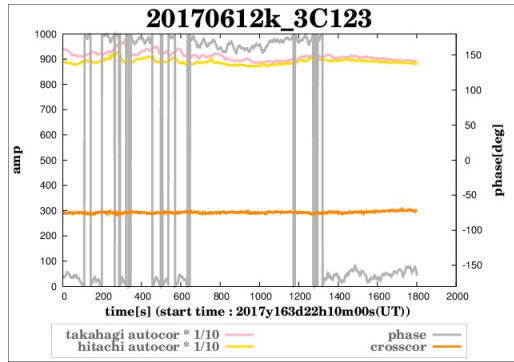


図 4.7: 3C123(20170612k)

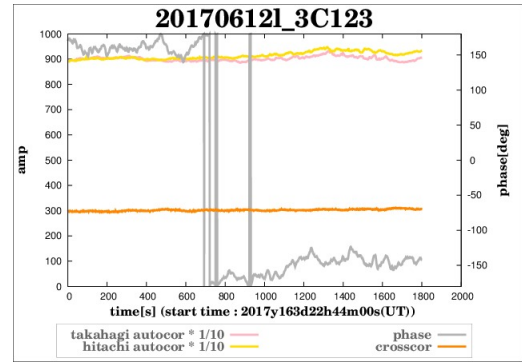


図 4.8: 3C123(20170612l)

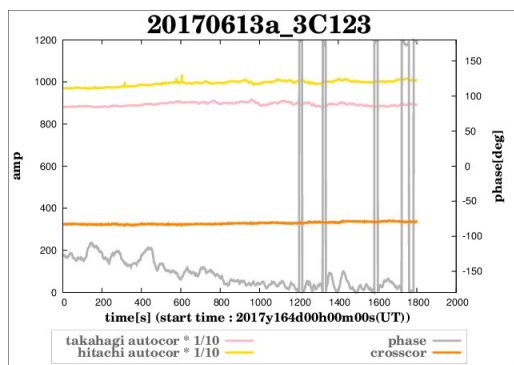


図 4.9: 3C123(20170613a)

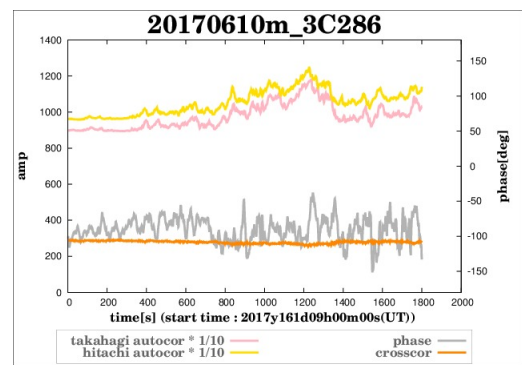


図 4.10: 3C286(20170610m)

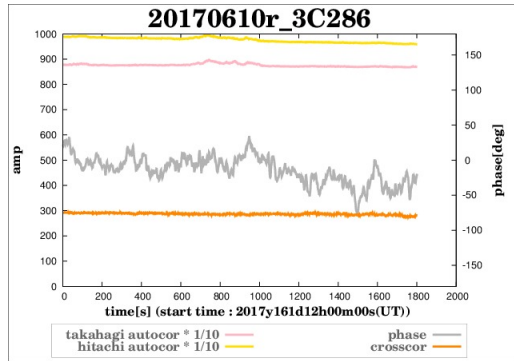


図 4.11: 3C286(20170610r)

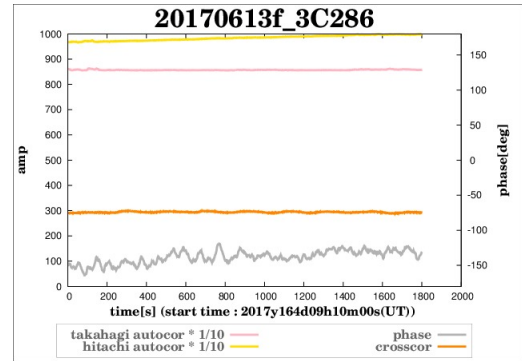


図 4.12: 3C286(20170613f)

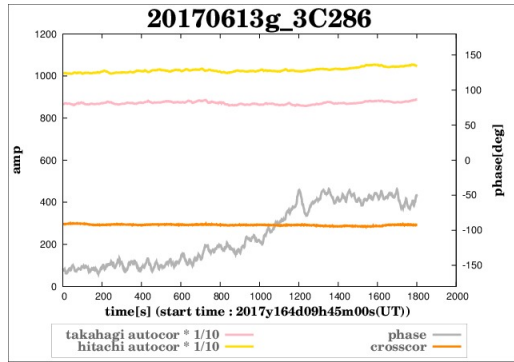


図 4.13: 3C286(20170613g)

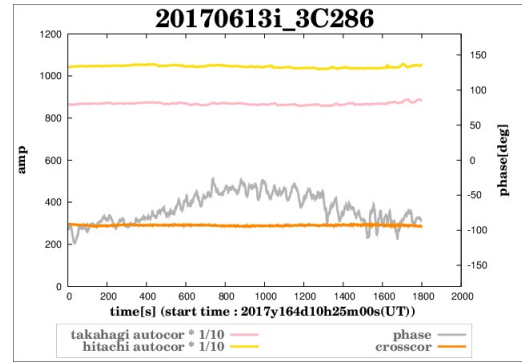


図 4.14: 3C286(20170613i)

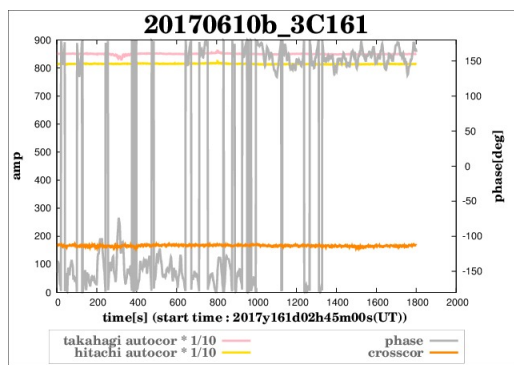


図 4.15: 3C161(20170610b)

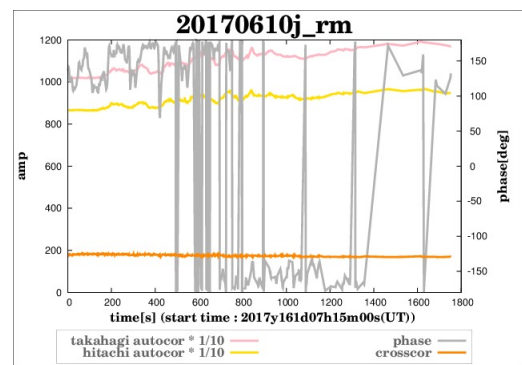


図 4.16: 3C161(20170610j)

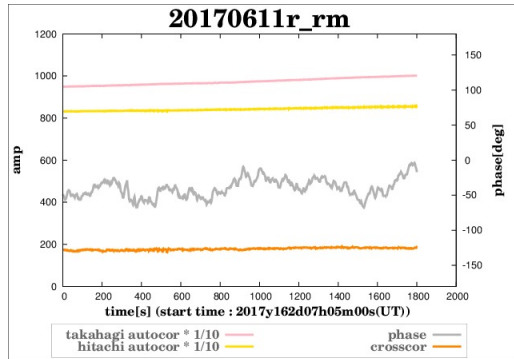


図 4.17: 3C161(20170611r)

これらの相互相関強度の 30 分間の平均を天体ごとに纏めると以下になった。異常データを消去する補正を行ったものは赤字で示している。データを消去しているため同じ 30 分観測でも異常データの含まないものにくらべ使用できた出力点数が異なっている (詳細は Appendix C に記す)。

表 8: 3C48 相互相関強度平均 (補正後)

観測コード名	相互相関強度の平均
20170611f	176.308084
20170612f	178.199676
20170612g	181.273454
20170612j	180.562601

表 9: 3C123 相互相関強度平均 (補正後)

観測コード名	相互相関強度の平均
20170609c	358.761528
20170611e	365.275433
20170612k	293.025825
20170612l	301.901820
20170613a	328.745321

表 10: 3C161 相互相関強度平均 (補正後)

観測コード名	相互相関強度の平均
20170610b	166.399328
20170610j	176.532584
20170611r	177.494328

表 11: 3C286 相互相関強度平均 (補正後)

観測コード名	相互相関強度の平均
20170610m	278.834402
20170610r	286.837398
20170613f	294.024333
20170613g	291.748075
20170613i	289.966132

これらの出力値は式 4.1 から分かるように、何等かの係数を掛け合わせることで Jy の単位となる無

次元量であるため単位は記していない。これらの結果を天体ごとにさらに平均した値が、表 12 である。

表 12: 天体ごとの相互相関強度平均とその標準偏差 (補正後)

天体名	平均値	標準偏差
3C48	179.085954	1.966
3C123	329.588384	29.137
3C161	173.475413	5.019
3C286	288.282068	5.276

ここで観測した天体は強度が既知であり、Ott et al., 1994([2]) によって強度が示されている。それを表 13 に示す。

表 13: 既知の天体強度 (Ott et al., 1994, [2])

	6 GHz 帯	8GHz 帯
3C48	4.17 Jy	3.33 Jy
3C123	11.76 Jy	9.29 Jy
3C161	4.82 Jy	3.79 Jy
3C286	6.10 Jy	5.20 Jy

今回の観測結果 (表 12) を横軸に、Ott et al., 1994([2]) で示されている強度 (表 13) を縦軸にプロットすると以下の図 4.18 のようになった。各天体ごとの 3 回から 5 回の測定結果である表 8 から表 10 の標

準偏差 (表 12 に記載) を、ここではエラーバーで示している。



図 4.18: 出力と実際の強度との比較

式 4.1 の α を求めるには、これらのプロットされた点が原点を通る直線に乗っている必要がある。この結果から、異常データを除去しても、プロットがひとつの直線上には乗らないように見える。

そこで、今回は 4 天体の結果を用いた α と、エラーバーの大きい 3C123 を除いた α の導出を行った。結果が以下であり、近似している直線の傾きが α に相当する。また、各プロット点の付近に記載しているパーセンテージは、近似直線から何パーセントずれたところにプロットがあるかを示している。

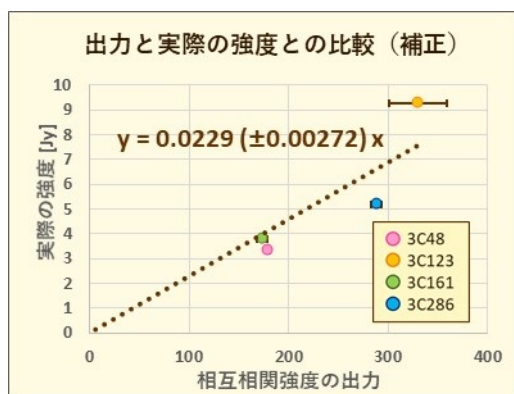


図 4.19: 4 天体でのフィッティング



図 4.20: 3 天体でのフィッティング (3C123 除く)

これらから、今回の結果では 4 天体で $\alpha = 0.0229 \pm 0.00272$ (11.9 %) であり、3C123 を除くと $\alpha = 0.0189 \pm 0.00281$ (5.59 %) であることが分かった。

考察

天体の強度が 2 倍になる、つまり 100 % の変動を有意に検出するには、 α の誤差は 10 % で良い。よって 3C123 の結果を含めなければ十分にこの精度には達している。一方で、実際には今回の結果以上の精度が見込まれる。

実際より今回の精度が悪くなったと推測される理由として、以下の 3 つが考えられる。

まず、異常でないように見えるデータも何等かの影響を受けている可能性がある。本相関器の 1.024 秒積分で積分するデータは 250000 点あるため、そのうち数点だけに異常が影響しても積分で均され判別できていないかもしれない。

次に、参考になっている天体強度の文献が古いため、今回の観測時の天体強度は文献値と異なっている可能性がある。

最後に、本相関器において dmxcal と名前が付いている「装置のキャリブレーション」の影響も考えられた。だがこの影響はないことが観測から判明した。Appendix D にその結果を示す。

結論

以上から、今回の結果では、エラーバーの大きかった 3C123 の結果を除くと天体の強度が 2 倍になる、つまり 100 % の変動を捉えられる精度がある α を求めることができた。一方で、参考になっている天体強度が現在は変化しているかもしれないこと、異常の影響が拭いきれていなかった可能性があることの 2 点から、本干渉計ではもっと精度の良い α を導出できると見込まれる。

異常の発生原因は前述のとおり解決済みである。§4.2 では、この異常データが発生していた原因を簡単に述べる。

4.2 異常発生の原因

§4.1 で述べた異常データの発生原因は、本システム中のサンプラーが発していたノイズであった可能性が非常に高い。本節では、そう考えられる理由について簡単に述べる。

まず、本サンプラーがノイズを発していると分かったのは、本サンプラーの電源を入れているときに、日立局で行っている 6.7 GHz メタノールレーザーのモニター観測の観測結果に影響が及んでいたからである。これは、エレクトクス工業による図 4.21 の対策と、その後の修理、さらにサンプラー設置位置の変更により解決した。サンプラー設置位置は図 4.22 のように巻取室にある状態から観測室へと変更

した。



図 4.21: サンプラーに施した対策

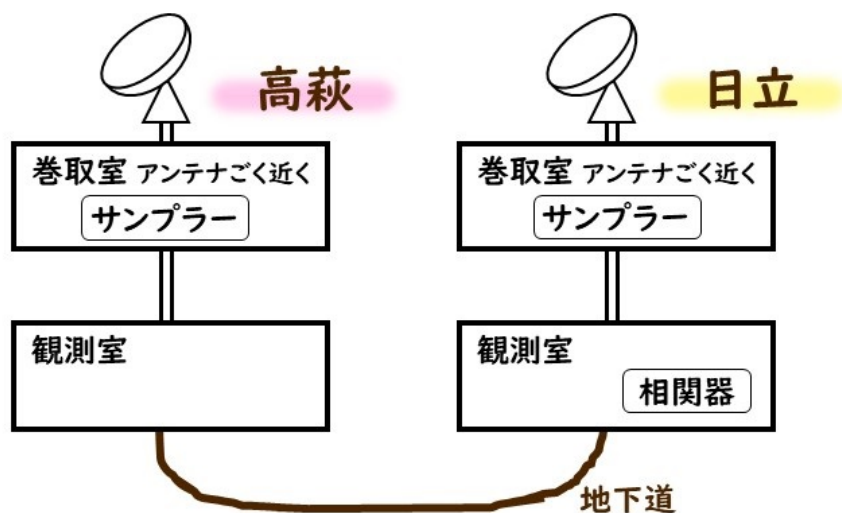


図 4.22: 局内の位置関係

さらに、この修理から後に §5.1 に述べる測定を行っているが、§4.1 から述べている異常と同様の状況は発生していない。

この修理や、アンテナの受信部から遠い観測室へのサンプラーの移動によって改善されたということは、巻取室では 6 - 9 GHz 及びそれを 0.5 - 1 GHz に変更した信号を伝送しており、観測室内では 0.5 - 1 GHz 及びそれ以下の信号を伝送していることを考えても、やはりサンプラーが発していた 6 - 9 GHz 付近のノイズが原因で異常が発生していた可能性が高い。

ちなみに、後述の §5.1 における測定は日立アンテナのみを使用している。2017 年 10 月から高萩アンテナはモーターの不具合により使用を中止しているため、サンプラー修理後に 2 台のアンテナを用いた相互相関を取っての観測はできていない。高萩アンテナ運用再開後に再度確認を行う必要はある。

4.3 本章のまとめ

本相関器の出力は、その設定によって値が変化する。そのために、強度が既知の 4 天体の観測を行い、式 4.1 における α の導出を試みた。結果、エラーバーの大きかった 3C123 の結果を除くと天体の強度が 2 倍になる、つまり 100 % の変動を捉えられる精度がある α を求めることができた。一方で、参考になっている天体強度が現在は変化しているかもしれないこと、異常の影響が拭いきれていなかった可能性があることの 2 点から、本干渉計ではもっと精度の良い α を導出できると見込まれる。

現在、異常発生は解決したと考えられる。高萩アンテナの運用が再開したら、同時に別の方法で天体強度を測定しながら同様の観測を行うことで更に精度の良い α を求められることが期待できる。

● 5 ● 測定 II. 設定値の評価

本章では、§3.2.5 で述べたビットシフト量の設定値”req” や”scal” の最適値を調べるために行った測定についてを述べる。以下の図 5.1 は図 3.11 と同様のものであり、この図のとおり”req”、”scal” はそれぞれ再量子化の前、出力の前のビットシフトの設定値である。

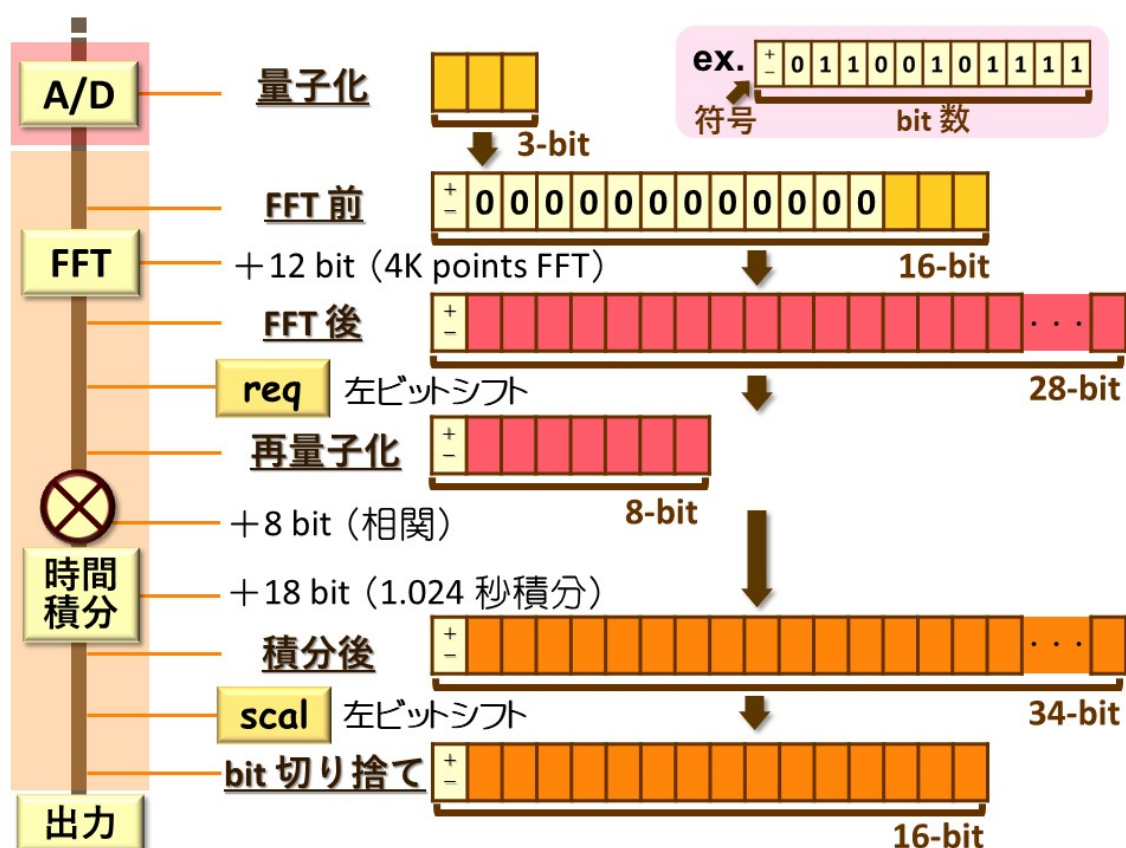


図 5.1: デジタル信号の流れ (図 3.11 と同様)

そして、これらの設定値の大きさによって図 5.2 のようにビットシフトが行われる。

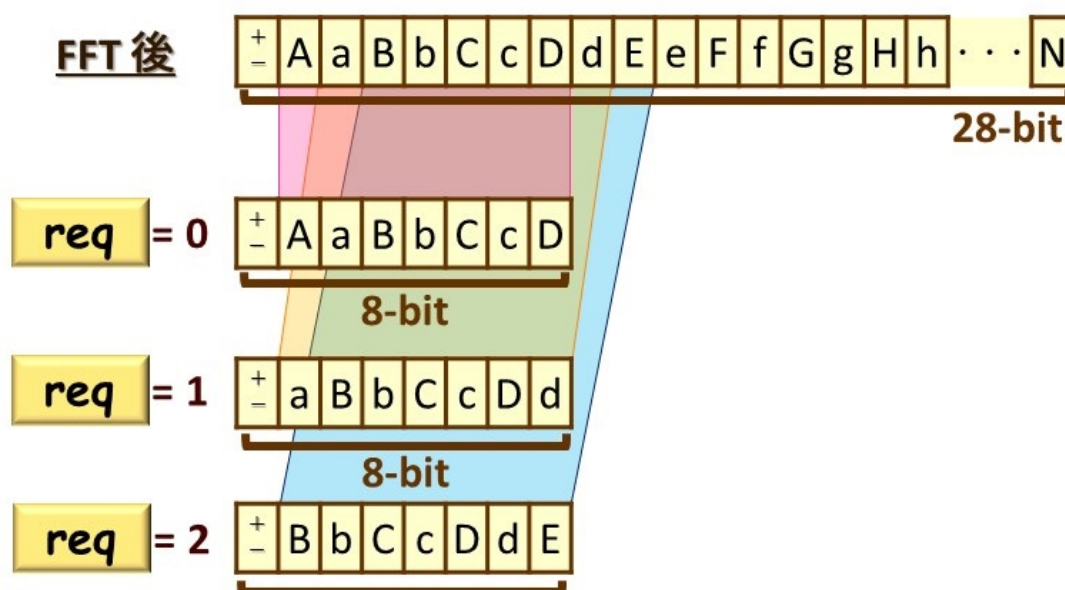


図 5.2: ビットシフト (図 3.12 と同様)

これらの最適な設定値を調査するために、様々な設定値の組み合わせでの測定を行うことにした。ただし、実際に観測する際には天体強度の差やアンテナの EL の違いによって入力信号強度が変化する。入力信号強度が変化すると §3.2.3 で述べた bit 分布が最適な状況から変化してしまう。よって、この変化分にも対応できる設定値を決めるため、まずは日立アンテナを用いて実際の観測で起こり得る入力信号強度の変化分を調べた。その内容を §5.1 に述べる。そして、§5.2 で設定値を変更させて測定した結果を述べる。

5.1 設定値の調整 - 日立アンテナを用いて -

本節では、実際の観測で起こり得る入力信号強度の変化を調べた測定結果を述べる。§5.1.1 ではアンテナのエレベーション変化や天体を視野に入れることによる入力信号強度変化の測定結果を述べ、§5.1.2 では入力信号強度の変化により bit 分布がどの程度変化するのかの確認を行った測定に触れる。

5.1.1 EL や天体による入力信号強度の変化

方法

パワーメーターの値を用いて、アンテナのエレベーションの値を変化させる、或いは天体を ON、OFF することで測定を行った。気象条件によっても変化してしまうため、曇りの日、晴れの日を選んで 2 回同じ内容の測定を行った。観測諸元が以下の表 14 である。

表 14: EL と天体による変化測定の観測諸元 (2018 年 10 月 26 日から 28 日にかけて)

アンテナ	日立32m	
観測周波数	8 GHz	8192 – 8704 [MHz]
帯域幅	512 MHz	
システム温度	8 GHz	～ 30 [K]
中間周波数	512 – 1024 [MHz]	
観測期間	2018年10月26日 – 2018年10月28日	
観測天体	3C84	

結果 1 EL 変化

アンテナのエレベーションを変化させてパワーメーターの値を読み取った結果が以下の表 15 と表 16 である。

表 15: EL 変化 DOY = 299(曇り) の結果

EL[°]	パワーメーター[dBm]
85	-30.300
15	-28.498
23	-29.674
5	-26.508

表 16: EL 変化 DOY = 301(晴れ) の結果

EL[°]	パワーメーター[dBm]
85	-30.987
15	-29.502
23	-30.106
5	-27.659

アンテナを駆動させる可能性のあるエレベーションの範囲は 5 度から 85 度だが、実際の観測で主に使用するであろう範囲は 15 度から 85 度である。今回の測定から 8 GHz 帯においては、実際の観測に使用するであろう 15 度から 85 度のエレベーションの変化に対応するには最大 2 dB の変化を許容できれば良いということが分かった。また、5 度から 85 度のエレベーション変化であれば 4 dB 許容できれば良い。ちなみに 6 GHz 帯においては大気の見通性が 8 GHz 帯より良いためこの範囲で十分である。22 GHz 帯では 8 GHz 帯よりも大気の見通性が良くないため、今後追加観測が必要である。

結果 2 天体導入

天体を ON、OFF してパワーメーターの値を読み取った結果が以下の表 17 と表 18 である。今回は Yonekura et al., 2016([3]) にて測定されている天体のうち、強度が大きく時間的に測定可能であった

3C84 を測定した。この天体は同論文にて 8.4 GHz での強度が約 15 Jy と示されている。よって以下の変化分が許容できれば、ある天体の観測から、その天体より 3C84 と同等の強度だけ大きい強度をもつ天体の測定は十分に可能だということになる。

結果 1 から分かるとおりアンテナのエレベーション変化によって測定される強度は変化する。今回は OFF の測定を天体を追尾しながらアジマス方向にアンテナを 120 arcmin ずらして行ったために、僅かではあるもののエレベーションの変化による影響も含まれる可能性がある。よって、念のため OFF の測定は必ず ON の測定より高いエレベーションで行った。（例えば、天体が昇っていく場合は ON 点の測定を先に、沈んでいく場合は OFF 点の測定を先に行った。）このことで、エレベーション変化の影響で ON と OFF の強度の差を低く見積もってしまうということを回避できている。

また、これらの結果は各日ごとに 2 回の測定結果の平均である。DOY = 299 では EL = 73 度付近、DOY = 301 では EL = 23 度付近で測定を行った。

表 17: 天体信号 DOY = 299（曇り）の結果

3C84	パワーメーター[dBm]
ON	-29.470
OFF	-30.222
差	0.752

表 18: 天体信号 DOY = 301（晴れ）の結果

3C84	パワーメーター[dBm]
ON	-29.193
OFF	-30.063
差	0.870

以上から、15 Jy 程度の観測天体の強度変化による入力信号強度の変化は 1 dB 以内であると分かる。

さらに、天体からの信号は大気によって吸収される。大気の光学的厚みの大きさが大きいほど多く吸収されてしまうため、この結果で曇りの日ほど天体信号を ON、OFF することによる差が小さくなっていることも理論と一致している。

また、天体の強度とパワーメーターの値の差はシステム雑音温度に依存する。6、8 GHz 帯ではシステム雑音温度が同じであるためこの 8 GHz 帯における結果は 6 GHz 帯でも適用できる。22 GHz 帯では 6、8 GHz 帯よりもシステム雑音温度が高いため、パワーの差がこの結果よりも小さくなると予想される。よって、この結果よりも差は小さくなる、即ち 22 GHz 帯を含めても 1 dB 以内の変化を許容できれば良い。

結論

8 GHz 帯では、最大で 3 dB 変化しても問題のない設定値を決められれば、アンテナ仰角が 15 度から 85 度変化することによる 2 dB の変化、天体のフラックス密度が 15 Jy 変化することによる 1 dB の変化に対応できることが分かった。

ここで、15 Jy までの天体の観測ではなく、敢えて天体のフラックス密度の 15 Jy の変化と言っているのは、入力信号強度を調整してからの変化を議論しているからである。つまり、入力信号強度の調整を、例えば 5 Jy の天体で行った場合には、1 dB の変化に対応できれば同じ EL では 20 Jy の天体まで観測できることになる。

また、ある天体を観測し続ける場合は、2 dB 範囲を確保できればアンテナ仰角 15 度から 85 度まで調整なしで観測可能である。さらに、6 dB の範囲を確保できればアンテナ仰角を 5 度から 85 度まで、観測天体のフラックス密度を天体を ± 15 Jy まで変化させられると予想できる。

これらは 6 GHz 帯の観測はほぼ同様であり、22 GHz では今度追測定をする必要がある。

5.1.2 入力信号強度の変化による bit 分布の変化

入力信号強度が変化すると、bit 分布が変化する。以下の図 5.3 は図 3.6 と同一のものである。

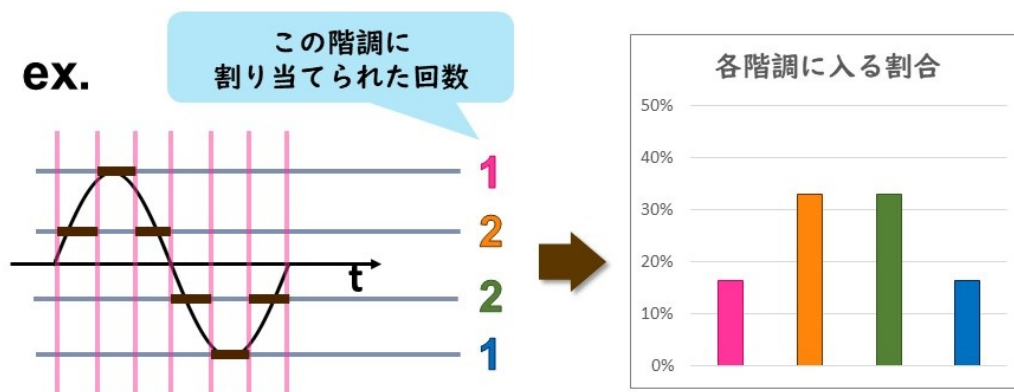


図 5.3: 入力信号 bit 分布

例えば入力信号強度が大きくなると、図 5.4 の左図のように最大の階調と最小の階調に割り当てられる回数が増える。そして極端な場合右図のようになる。

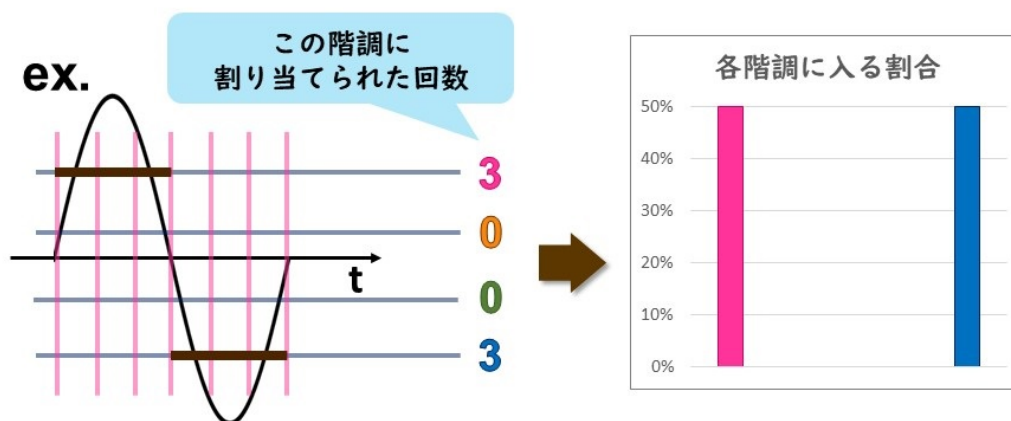


図 5.4: 入力信号が大きいときの bit 分布

逆に入力信号強度が小さくなると、図 5.5 のように中心に割り当てられる回数が増える。

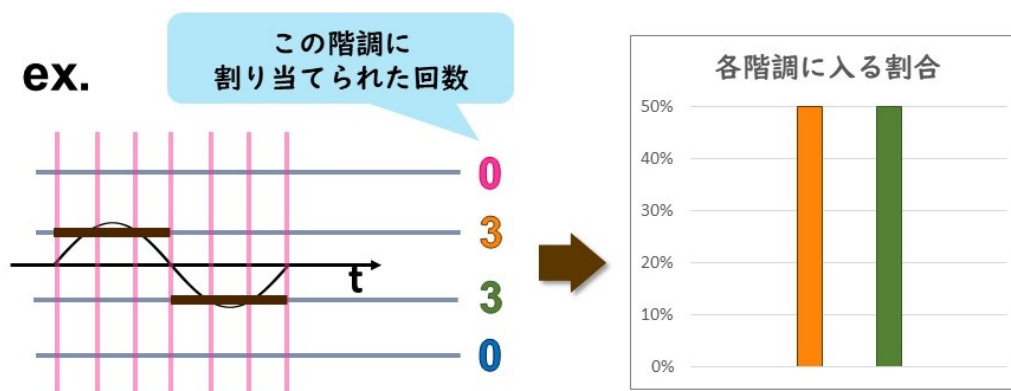


図 5.5: 入力信号が小さいときの bit 分布

ここでは、このように入力信号強度が変化すると、本相關器の入力信号 bit 分布がどの程度変化するかをアッテネーターを用いて入力信号強度を変化させながら調べた。アッテネーターは追加するほど入力信号強度が小さくなり、抜くほど大きくなる。その結果が図 5.6 である。図 5.7 と図 5.8 は図 5.6 を 2 つに分けたもので、図 5.7 が入力信号強度最適と思われる状態からアッテネーターを追加したもの、図 5.8 がアッテネーターを抜いたものである。図中の att1、att2 などアッテネーター 1 dB 追加、2 dB 追加などを表している。

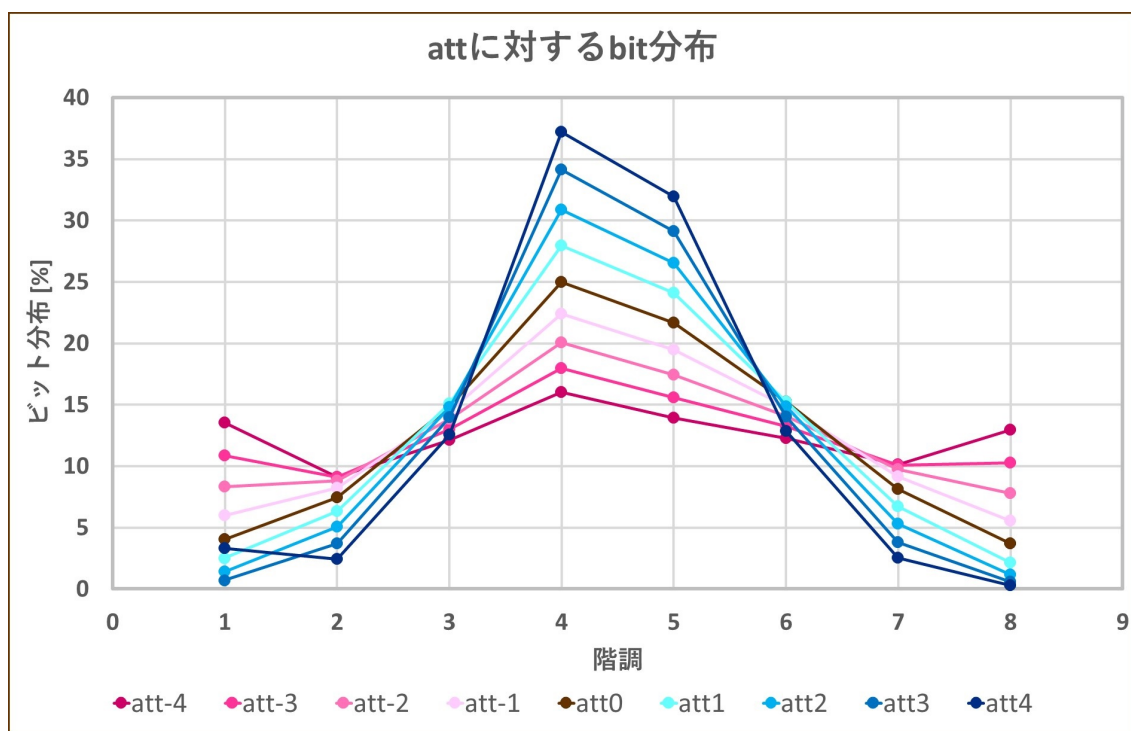


図 5.6: アッテネーター値に対する入力信号 bit 分布

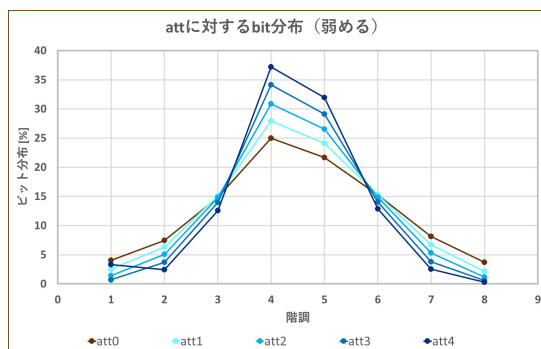


図 5.7: アッテネーター削減時の入力信号 bit 分布

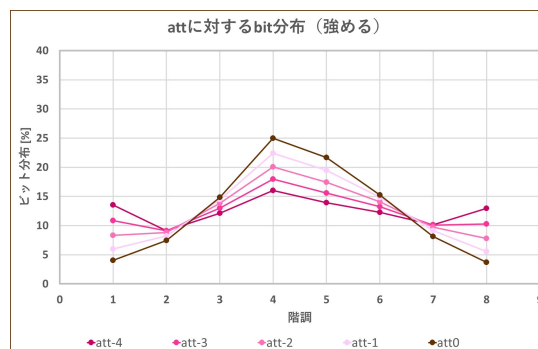


図 5.8: アッテネーター追加時の入力信号 bit 分布

本相関器でも、理論どおり入力信号強度を弱めると中心の階調に入る頻度が高くなり、強めると平坦に近くなり徐々に両端の階調に割り当てられる頻度が高くなることが分かった。

5.2 設定値の調整 - ホワイトノイズを用いて -

最適な”req”、”scal” の設定値を調べるため、アンテナからの信号よりも安定であるホワイトノイズ源を用いて、設定値を様々変えた測定を行った。

実際には高萩局、日立局の両局を用いて天体を追尾した相互相関強度の結果で評価する必要があるが、高萩アンテナ運用停止中のため現在ではまだ実現できていない。また、日立アンテナの自己相関強度を用いて設定値を変化させた観測は行っているが、自己相関強度は天体以外の時間や EL に依存する情報を含んでしまう。よって設定値の変化についての議論が正確にはできないため、ここでは議論しない。

ではまず、本測定の概要を表 19 に示す。

表 19: ホワイトノイズ測定概要 (2018 年 11 月 12 日から 12 月 21 日にかけて)

サンプラー・相関器	エレックス工業製サンプラー、FX型ハードウェア相関器 OCTAD-C
帯域幅	512 MHz
システム温度	～ 30 [K]
中間周波数	512 – 1024 [MHz]
サンプルビット数	3 [bit]
サンプリングレート	1024 [Msamples / s]
観測期間	2018年11月12日 – 2018年12月21日

次に、本測定の一覧をおおまかに示す。本測定は設定値”req” と”scal”、またアッテネーターの値を変化させて行っている。アッテネーターの値は、§5.1 の結果から ± 3 dB の範囲で測定を行った。表のそれぞれの欄には測定コード名を記している。測定コード名は測定月日を頭の 4 つの数字で表されている。これらの大半を以下の結果に用いているため、またどのような測定を行ったか具体的に提示するために念のため記載しておく。また、これらの測定はすべて 30 分間の測定である。ちなみに、表中に記している色付きの ★ 等の記号は、後の議論で使用している測定が何か分かりやすくするために示している。

入力信号強度：最適

表 20: 測定一覧 (req= 0 – 3, scal= 0 – 9, att 最適)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1112a_1, 3 ★	1217e_1	1217e_2	1217e_3	1217e_4	1217f_1	1217f_2	1217f_3	1217f_4	1217g_1
1	1112a_2, 4 ★	1217a_1	1217a_2	1217a_3	1217a_4	1217b_1	1217b_2	1217b_3	1217b_4	1217c_1
2	1112b_1, 3 ★	1216j_1	1216j_2	1216j_3	1216j_4	1216k_1	1216k_2	1216k_3	1216k_4	1216l_1
3	1112b_2, 4 1116b_2 ★	1216b_3	1216c_1	1216c_2	1216c_3	1216d_1	1216d_2	1216d_3	1216d_4 1218d_1, 2 1218d_3, 4 ✱	1221a_1

表 21: 測定一覧 (req= 0 – 3, scal= 10 – 19, att 最適)

scal req	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	1217g_2	1217g_3	1217g_4	1217h_1	1217h_2 1218a_1, 2 1218a_3, 4 ✱	1217h_3	1209a_2 1217h_4	1217i_1	1217i_2	1217i_3
1	1217c_2	1217c_3	1217c_4 1218b_1, 2 1218b_3, 4 ✱	1217d_1	1209a_3 1217d_2	1217d_3	1217d_4			
2	1216l_2 1218c_1, 2 1218c_3, 4 ✱	1216l_3	1209a_4 1216l_4	1216m_1	1216m_2	1216m_3	1216m_4			
3	1121a_2	1121a_3	1121a_4							

表 22: 測定一覧 (req= 4 – 11, scal= 0 – 9, att 最適)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	1112c_1, 2 1115a_1 ★	1115b_1	1115c_1	1115d_1	1115e_1	1115f_1	1115g_1 1218e_1, 2 1218e_3, 4 ♣	1115h_1	1115i_1	1116b_1
5	1112c_2, 4 1115a_2 ★	1115b_2	1115c_2	1115d_2	1115e_2 1219a_1, 2 1219a_3, 4 ♣	1115f_2	1115g_2	1115h_2	1115i_2	
6	1112d_1, 3 1209a_1 ★ ♠	1115b_3	1115c_3 1219b_1, 2 1219b_3, 4 ♣	1115d_3 ♠	1115e_3 ♠	1115f_3 ♠	1115g_3	1115h_3	1115i_3	
7	1112d_2, 4 1115a_4 1219c_1, 2 1219c_3, 4 ★ ♣	1115b_4	1115c_4	1115d_4	1115e_4	1115f_4	1115g_4	1115h_4	1115i_4	
8	1112e_1, 3 ★	1116b_4	1116c_4							
9	1112e_2, 4 ★									
10	1112f_1, 3 ★									
11	1112f_2, 4 ★									

入力信号強度：強め (att = -1dB)

表 23: 測定一覧 (req= 3 – 8, scal= 0 – 10, att = -1dB)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	1216g_1 1216g_3			1122m_4	1123g_4	1213d_3	1213d_4	1215b_3	1215b_4	1216d_3	1216d_4
4	1216g_2 1216g_4	1122a_1	1122g_1	1122m_1	1123g_1	1213d_1	1215b_1	1216d_1	1216d_2		
5	1216h_1 1216h_3	1122a_2	1122g_2	1122m_2	1123g_2	1213d_2	1215b_2				
6	1216h_2 1216h_4	1122a_3	1122g_3	1122m_3	1123g_3						
7	1112i_1 1112i_3	1122a_4	1122g_4								
8	1112i_2 1112i_4										

入力信号強度：強め (att = -2dB)

表 24: 測定一覧 (req= 3 - 8, scal= 0 - 10, att = -2dB)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	1112j_1 1112j_3				1123h_4	1219d_3	1213e_4 1219d_4	1215c_3	1215c_4	1216e_3	1216e_4
4	1112j_2 1112j_4	1122b_1	1122h_1	1123c_1	1123h_1	1213e_1 1219d_1	1215c_1	1216e_1	1216e_2		
5	1216i_1 1216i_3	1122b_2	1122h_2	1123c_2	1123h_2	1213e_2 1219d_2	1215c_2				
6	1216i_2 1216i_4	1122b_3	1122h_3	1123c_3	1123h_3						
7	1112l_1 1112l_3	1122b_4	1122h_4								
8	1112l_2 1112l_4										

入力信号強度：強め (att = -3dB)

表 25: 測定一覧 (req= 3 - 8, scal= 0 - 10, att = -3dB)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	1112m_1 1112m_3			1123b_4	1123i_4	1213f_3	1213f_4	1215d_3	1215d_4	1221c_3	1216f_4 1221c_4
4	1112m_2 1112m_4	1122c_1	1122i_1	1123b_1	1123i_1	1213f_1	1215d_1	1216f_1 1221c_1	1216d_2 1221c_2		
5	1114b_1 1114b_3	1122c_2	1122i_2	1123b_2	1123i_2	1213f_2	1215d_2				
6	1214b_2 1214b_4	1122c_3	1122i_3	1123b_3	1123i_3						
7	1114c_1 1114c_3	1122c_4	1122i_4								
8	1114c_2 1114c_4										

入力信号強度：弱め (att = +1dB)

表 26: 測定一覧 (req= 3 – 8, scal= 0 – 10, att = +1dB)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	1114d_1 1114d_3			1122j_4	1123d_4	1213a_3	1213a_4	1221a_3	1213g_4 1221a_4	1216a_3	1216a_4
4	1114d_2 1114d_4	1121b_1	1122d_1	1122j_1	1123d_1	1213a_1	1213g_1 1221a_1	1216a_1	1216a_2		
5	1114e_1 1114e_3	1121b_2	1122d_2	1122j_2	1123d_2	1213a_2	1213g_2 1221a_2				
6	1114e_2 1114e_4	1121b_3	1122d_3	1122j_3	1123d_3						
7	1114f_1 1114f_3	1121b_4	1122d_4								
8	1114f_2 1114f_4										

入力信号強度：弱め (att = +2dB)

表 27: 測定一覧 (req= 3 – 8, scal= 0 – 10, att = +2dB)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	1114g_1 1114g_3			1122k_4	1123e_4	1213b_3	1213b_4	1213h_3	1213h_4	1221b_3	1216b_4 1221b_4
4	1114g_2 1114g_4	1121c_1	1122e_1	1122k_1	1123e_1	1213b_1	1213h_1	1216b_1 1221b_1	1216b_2 1221b_1		
5	1114h_1 1114h_3	1121c_2	1122e_2	1122k_2	1123e_2	1213b_2	1213h_2				
6	1114h_2 1114h_4	1121c_3	1122e_3	1122k_3	1123e_3						
7	1114i_1 1114i_3	1121c_4	1122e_4								
8	1114i_2 1114i_4										

入力信号強度：弱め (att = +3dB)

表 28: 測定一覧 (req= 3 – 8, scal= 0 – 10, att = +3dB)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	1114j_1 1114j_3			1122l_4	1123f_4	1213c_3	1213c_4	1215a_3	1215a_4	1216c_3	1216c_4
4	1114j_2 1114j_4	1121d_1	1122f_1	1122l_1	1123f_1	1213c_1	1215a_1	1216c_1	1216c_2		
5	1114k_1 1114k_3	1121d_2	1122f_2	1122l_2	1123f_2	1213c_2	1215a_2				
6	1114k_2 1114k_4	1121d_3	1122f_3	1122l_3	1123f_3						
7	1114l_1 1114l_3	1121d_4	1122f_4								
8	1114l_2 1114l_4										

§3.2.5 で述べたとおり、本相関器の出力は 16 bit である。これは符号を含む 16 bit であるため、実際に表現できる値の大きさは $2^{15} = 32768$ である。あまりに”req” や”scal” の値が大きいと、ビットシフトすぎて 16 bit では表現できなくなってしまう。そのためにまず §5.2.1 では”req” や”scal” がどの程度の大きさになるとこの上限値の影響を受けてしまうか上記測定の結果から議論する。そして §5.2.2 で上限値の影響がないだろう”req” や”scal” の組み合わせを用いて、ビットシフト量の最適値からのズレにより発生する影響について SNR の劣化を指標として考える。

5.2.1 上限値の影響

1 req 値による違い

§3.2.5 で述べたとおり、FFT の後に”req” の大きさだけ左ビットシフトし、再量子化で 8 bit に下位ビットが切り捨てられる。再量子化の後には積分が行われる。その積分後のデータを”scal” の大きさだけ左ビットシフトして、上位 16 bit が出力される。また、”req” によるビットシフトでそのデータの最上位ビットよりも上位のデータが存在してしまった場合、つまり図 5.9 の req= 2 のようになった場合は「オーバーフロー」となる。

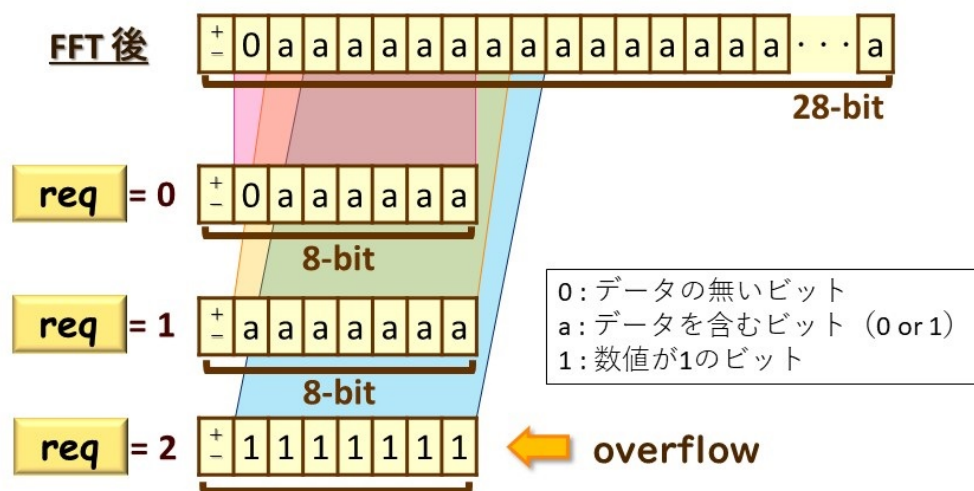


図 5.9: オーバーフローとなる状態の例

(例のため、実際にオーバーフローが起こる req 値とは異なる)

そこで、上限値の影響を調べるために出力前のビットシフト量”scal” を 0 とした場合どのような結果になるか調べた。まず、scal= 0 として”req” の値を変化させたときの出力の自己相関スペクトルを示す。これらは 1.024 秒積分 1 点の結果である。(これらの結果は測定一覧の表 20 から表 28 における ★ の測定結果であり、入力信号強度は最適に調節している。)

また、これらの結果はスペクトルの形状を示すために縦軸の表示範囲を揃えていないことにご注意いただきたい。

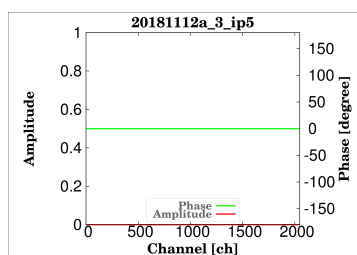


図 5.10: 自己相関
(req= 0, scal= 0)

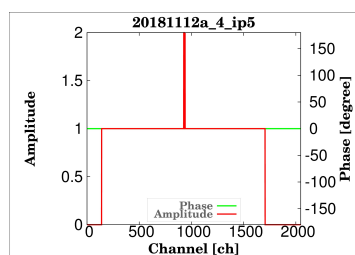


図 5.11: 自己相関
(req= 1, scal= 0)

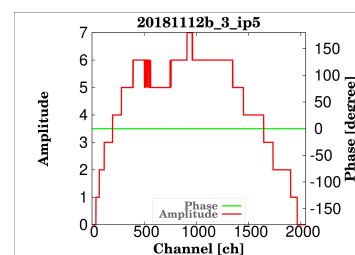


図 5.12: 自己相関
(req= 2, scal= 0)

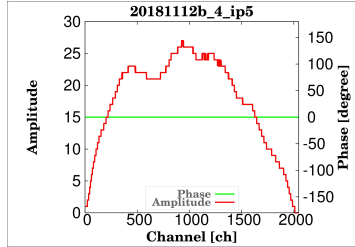


図 5.13: 自己相関
(req= 3, scal= 0)

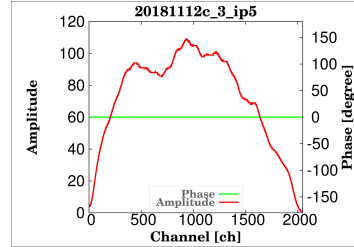


図 5.14: 自己相関
(req= 4, scal= 0)

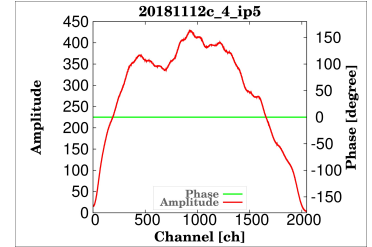


図 5.15: 自己相関
(req= 5, scal= 0)

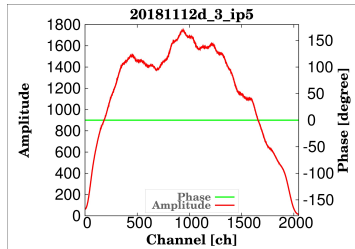


図 5.16: 自己相関
(req= 6, scal= 0)

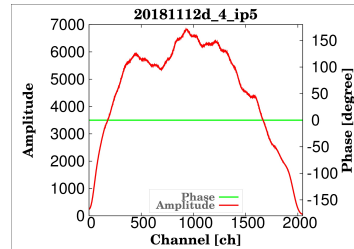


図 5.17: 自己相関
(req= 7, scal= 0)

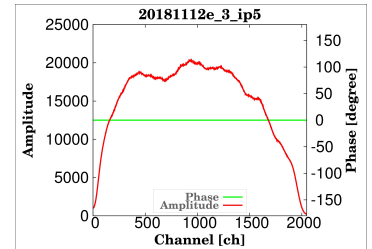


図 5.18: 自己相関
(req= 8, scal= 0)

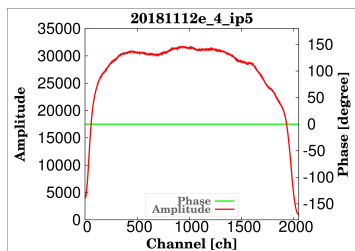


図 5.19: 自己相関
(req= 9, scal= 0)

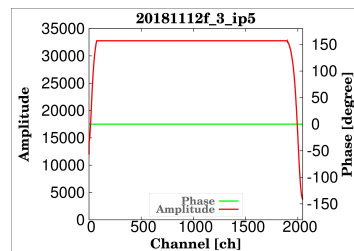


図 5.20: 自己相関
(req= 10, scal= 0)

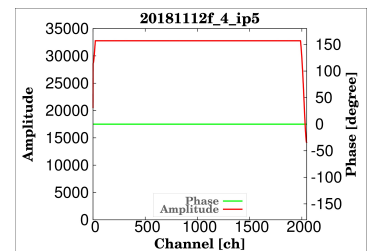


図 5.21: 自己相関
(req= 11, scal= 0)

これらの結果の縦軸を見ると、req = 10, 11 の強度は広いチャンネルにおいて出力の最大値となっていることが分かる。“scal” も “req” 同様左ビットシフトの数値であるため、scal = 0 で出力が最大値となってしまう req 値は上限値の影響で使えないということになる。よって、req ≤ 9 にする必要がある。

次に req の小さいスペクトル (req ≤ 3) では、強度の最大値が小さくなっていて滑らかなスペクト

ルを再現できていないように思える。この理由は req 値が小さくビットシフトが足りなかった可能性も考えられるが、出力前のビットシフト量に対応する”scal” 大きくすると解決する可能性もある。よって上限値の影響は出ないためここでは詳しく触れず後に議論する。

さらに req = 8, 9 では $4 \leq \text{req} \leq 7$ に比べてスペクトルが縦方向に潰れているように見える。ここで、処理過程をもう一度詳しく考えてみる。req 値によって左ビットシフトされたデータは再量子化されて、積分される。この積分は前述のとおり 2^{18} 点積分である。例として示した図 5.9 の req = 1 のような状態あるいはそれよりデータを含むビットが少ない状態が 2^{18} 個すべてのデータで続けば問題ないが、多数ある 1 積分点のなかのデータにはこの図 5.9 における req = 2 のようにオーバーフローしてしまうデータが含まれてしまう可能性は大いにある。オーバーフローしてしまうデータは最大値をとるので、 2^{18} 点のうちにある程度そのようなデータが含まれるとスペクトル特性が均されてしまうと予想できる。図 5.20 や図 5.21 に対応する実際の結果の req = 10 以上では広いチャンネルに対して最大値になっていたことから、req = 8, 9 のスペクトルが縦方向に潰れている原因はこれで間違いないだろう。

req = 8, 9 はスペクトルを見てある程度判別できるが、req=7 に上限値の影響がないか目では判断できない。よって、強度の周波数に対する平坦さを標準偏差を用いて判別することにした。その方法を述べる。

まず、図 5.10 から図 5.21 の強度の値を図 5.22 のように 501 ch から 1500 ch まで取り出す。

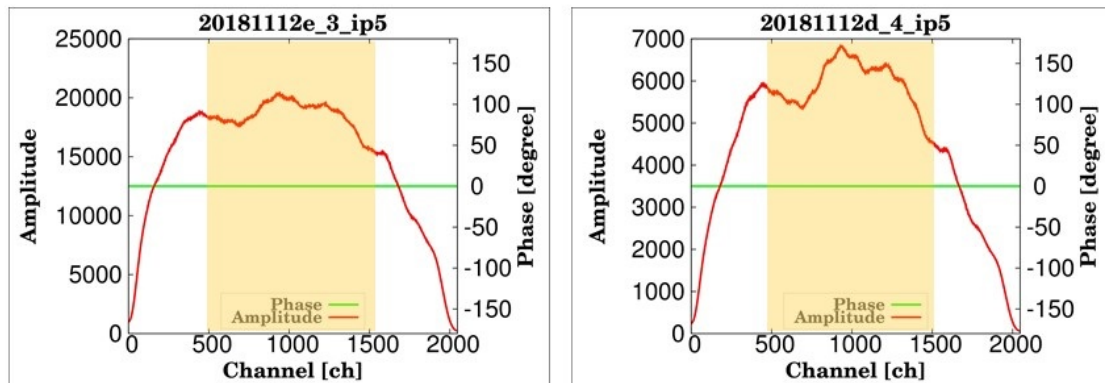


図 5.22: 平坦さの計算に使用するチャンネル幅
(左図は req = 8、右図は req = 7 のスペクトルに対応している)

この幅について、平坦さを判別するための「フラットネス判別値」を求めた。このフラットネス判別値は、 i をチャンネル、 y_i をそのチャンネルでの強度、 $\bar{y}$ を 501 ch から 1500 ch までの強度の平均値、 N を使用するチャンネル数の 1000 とすると、

$$\text{フラットネス判別値} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}{\bar{y}} \quad (5.1)$$

という式で計算している。この式はつまり図 5.22 で塗りつぶされている範囲のばらつきの程度を表しているため、この値が小さいほどスペクトルの周波数特性が平坦ということになる。所謂 SNR を求めているわけではないことに注意してほしい。

その結果が以下の表 5.23 である。

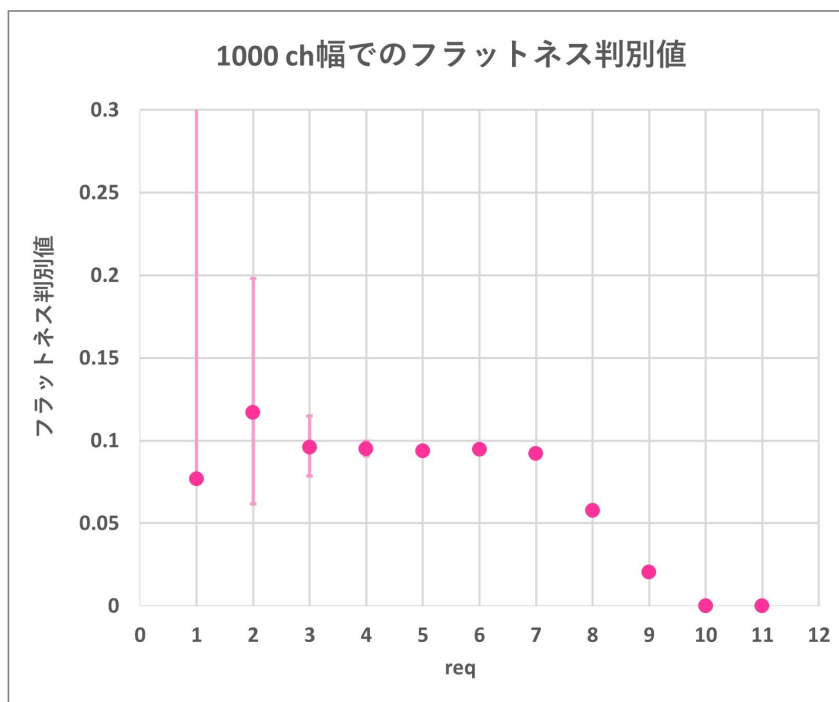


図 5.23: req 値ごとのフラットネス判別値

この結果から、 $\text{req} \geq 8$ では $\text{req} \leq 7$ に比べて周波数特性が均されていることが分かる。つまり、req 値が 8 以上の場合はオーバーフローの影響が入ってしまう。

この図 5.23 のエラーバーは単純に、各チャンネルにおける出力の相関強度が整数であることから出力の相関強度と本来の相関強度には凡そ $(\text{出力値}) - 0.5 \leq (\text{本来の相関強度}) \leq (\text{出力値}) + 0.5$ という関係があることを用いて求めたものである。具体的には上方向のエラーバーを

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|y_i - \bar{y}| + 0.5)^2}}{\bar{y}} \quad (5.2)$$

として、下方向のエラーバーを

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|y_i - \bar{y}| - 0.5)^2)}{\bar{y}} \quad (5.3)$$

として求めている。ただこのエラーは図 5.23 を見ると分かるように req 値の大きいところではほぼ効いてこない。よってフラットネス判別値は上限値の影響の調査には十分使用できる。また、req = 0 では計算したチャンネルのすべての範囲において出力値が一緒であるため表示していない。

以上から、req ≥ 8 では上限値の影響を受けることが分かった。オーバーフローの影響を受けないようにするためには、req ≤ 7 にしなければならない。

2 scal 値による違い

先ほどのスペクトルにおいて、req 値の小さいスペクトル (req ≤ 3) では、強度の最大値が小さくなっていて滑らかなスペクトルを再現できていないように思えると述べた。ひょっとすると積分後、有効なビットを出力前の下位ビット切り捨てにより落としてしまっていたかもしれない。この過度な切り捨ては”scal” の値を大きくすることで解決可能である。よって、各 req 値ごとにどの scal 値が最も有効に出力 16 bit を使用しているか調査する必要がある。

ここではまず、req = 6 の場合を議論する。先ほどと同様 1.024 秒積分 1 点の結果を、0 ≤ scal ≤ 5 について載せる。これらの縦軸の表示範囲も敢えて揃えていない。(これらの結果は測定一覧の表 20 から表 28 における 🔵 の測定結果である。)

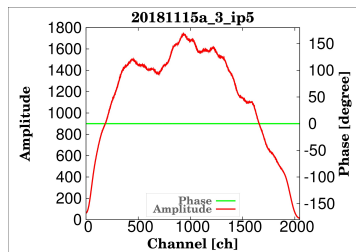


図 5.24: 自己相関
(req= 6, scal= 0)

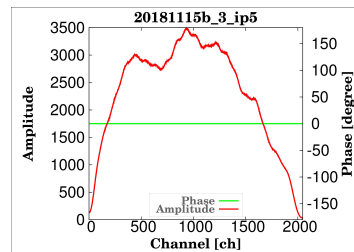


図 5.25: 自己相関
(req= 6, scal= 1)

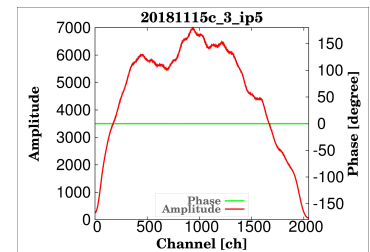


図 5.26: 自己相関
(req= 6, scal= 2)

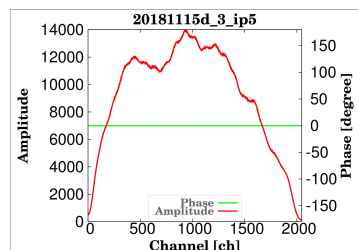


図 5.27: 自己相関
(req= 6, scal= 3)

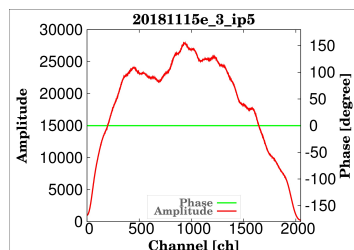


図 5.28: 自己相関
(req= 6, scal= 4)

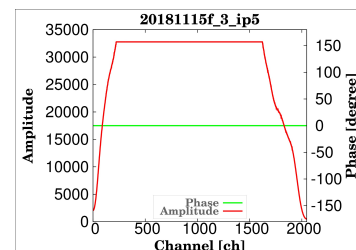


図 5.29: 自己相関
(req= 6, scal= 5)

これらの結果から、req = 6 では出力の上限値を超えていない scal = 4 まで使用可能であることが分かる。

ただ、今回の結果はホワイトノイズの測定である。今回は自己相関をとっているが、実際の測定の相互相関強度は異なる信号の相関をとるため今回と比べて相関後の有効な bit 数は少なくなる。相関前の設定値である”req” はホワイトノイズを用いた本測定結果とほぼ変わらないと推測できるが、出力中の有効な bit 数を多くできる”scal” の最適値は、特に相互相関では異なるはずだ。

図 3.11 から、”req” は相関を取る前、”scal” は相関後の左ビットシフト量の設定値であるため、オーバーフローの影響を考えなければ、req 値を 1 変化させることは”scal” を 2 変化させることに対応する。req = 6 における最大の”scal” は 4 であることから、req = 5 では scal = 6、req = 4 では scal = 8、req = 3 では scal = 10、req = 2 では scal = 12、req = 1 では scal = 14、req = 0 では scal = 16 が使用可能な最大の scal 値であると推定できる。

ただ、これは理論上の推測であるため、実際に表 20 から表 22 の測定から、表 29 にどの組み合わせ

で使用可能かをまとめた。

表 29: 上限値の影響がない設定値の組み合わせ

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×			
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×			
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×			
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×										
5	○	○	○	○	○	○	○	×	×											
6	○	○	○	○	○	×	×	×	×											
7	○	○	○	×	×	×	×	×	×											
8	×	×	×																	
9	×																			
10	×																			
11	×																			

○ で使用可能、× で使用できないことを示している。斜線部は測定していない。

3 入力信号強度による違い

表 29 は入力信号強度を最適にした場合の結果である。同様のことを、入力信号強度をアッテネーターによって変化させた測定でも行った。

ただ、アッテネーターを追加して入力信号強度を小さくすると使用できる設定値は増えると予想できるが、そもそも入力信号強度を最適にした場合に出力の上限値を超えてしまっていたものは使用できない。よって、ここでは基本的に表 29 において ○ であったものについてを評価した。また、測定時間の都合上 $3 \leq \text{req} \leq 8$ のみで解析した。

まず、入力信号強度を強めた測定についての結果を記載する。表 29 と結果が異なる部分を赤で強調

して示す。

表 30: 上限値が影響しない設定値 (att-1dB)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×									
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○											
5	○	○	○	○	○	○	○													
6	○	○	○	○	×															
7	○	○	○																	
8	×																			

表 31: 上限値が影響しない設定値 (att-2dB)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×									
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○											
5	○	○	○	○	○	○	×													
6	○	○	○	○	×															
7	○	○	×																	
8	×																			

表 32: 上限値が影響しない設定値 (att-3dB)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×									
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○											
5	○	○	○	○	○	○	×													
6	○	○	○	○	×															
7	○	○	×																	
8	×																			

入力信号強度を強めるほど、上限値に達し使用できなくなる設定値が少し増えることが分かる。

そして入力信号強度を弱めた場合の結果は、

表 33: 上限値が影響しない設定値 (att+1dB)

scal req	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
3	○			○	○	○	○	○	○	○	○									
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○											
5	○	○	○	○	○	○	○													
6	○	○	○	○	○															
7	○	○	○																	
8	×																			

となった。これは入力信号強度が最適の場合と同様の結果である。アッテネーターを 2 dB、3 dB と追加しても結果は同じであった。入力信号強度を弱めると強度は小さくなると考えられるため、この結果はこの予想どおりである。

以上から、ビットシフトしすぎてしまう”req” と”scal” の組み合わせを求めることができた。

5.2.2 SNR

この節では req 値によって出力の SNR がどれだけ変化するかを議論する。実際には”scal” を適切に設定しないためにビット切り捨てによる誤差が大きくなり SNR が悪くなることも考えられるが、それは §5.2.1 の結果を使用することで回避できる。この評価には後に述べるように出力中の有効な bit 数が同程度になると考えられる”req” と”scal” の組み合わせを使用した。

まずはどの設定値での測定結果を使用するか述べ、次にそのスペクトルについて議論する。そして SNR や出力値の評価を行う。

使用する設定とそのスペクトル

前述のとおり、”req” は相関を取る前、”scal” は相関後の左ビットシフト量の設定値であるため、req 値を 1 変化させることは”scal” を 2 変化させることに対応する。つまり出力値を同様に評価できるのは req 値が 1 大きければ scal 値は 2 小さいものということになる。

ちなみに、左に 1 つビットシフトすることは値が 2 倍になることに対応する。また、相関をとると電圧からパワーの次元になる。よって、相関後のビットシフトである”scal” は 1 大きくすると出力が 2 倍に、相関前のビットシフトである”req” は 1 大きくすると出力が 4 倍になる。図 5.10 から図 5.21 までの図の強度の最大値も、req 値が 1 大きくなるごとにおおよそ 4 倍になっていることが分かる。

ここでは、req 値による SNR の変化を調べるため、 $0 \leq \text{req} \leq 7$ についてそのような関係になっている”scal” 値の結果を選んで評価することとする。表 29 から、可能な組み合わせは

$$(\text{req}, \text{scal}) = (0, 14), (1, 12), (2, 10), (3, 8), (4, 6), (5, 4), (6, 2), (7, 0) \quad (5.4)$$

$$(\text{req}, \text{scal}) = (0, 15), (1, 13), (2, 11), (3, 9), (4, 7), (5, 5), (6, 3), (7, 1) \quad (5.5)$$

であることが分かる。今回は式 5.4 の結果を使用した。(測定一覧の表 20 から表 28 における ♣ の測定結果である。)

では、これらのスペクトルを示す。これらは測定時間中のある 1.024 秒積分の結果である。

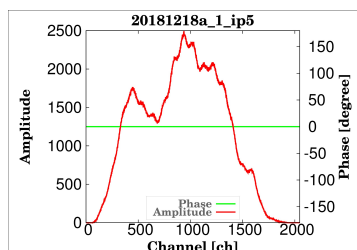


図 5.30: 自己相関
(req= 0, scal= 14)

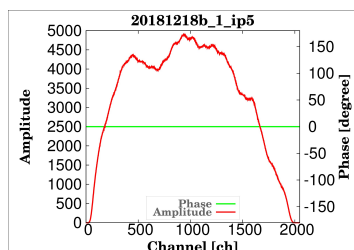


図 5.31: 自己相関
(req= 1, scal= 12)

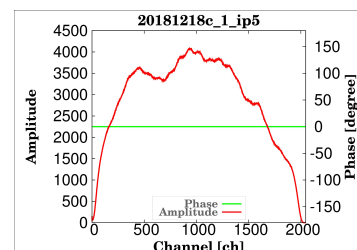


図 5.32: 自己相関
(req= 2, scal= 10)

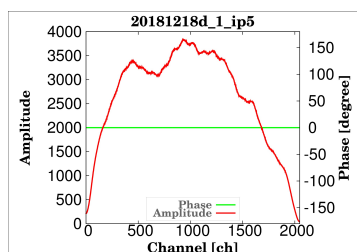


図 5.33: 自己相関
(req= 3, scal= 8)

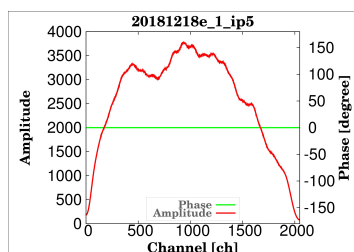


図 5.34: 自己相関
(req= 4, scal= 6)

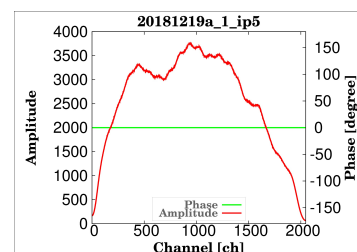


図 5.35: 自己相関
(req= 5, scal= 4)

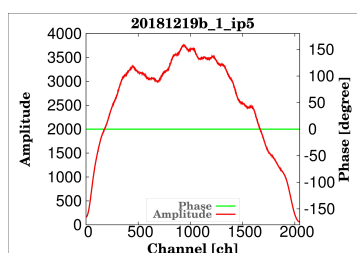


図 5.36: 自己相関
(req= 6, scal= 2)

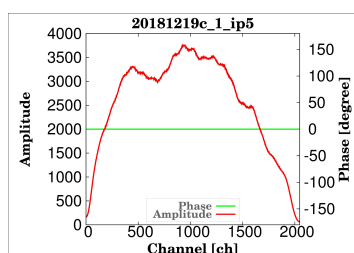


図 5.37: 自己相関
(req= 7, scal= 0)

ちなみに、これらのスペクトルを重ねると図 5.38 のようになる。

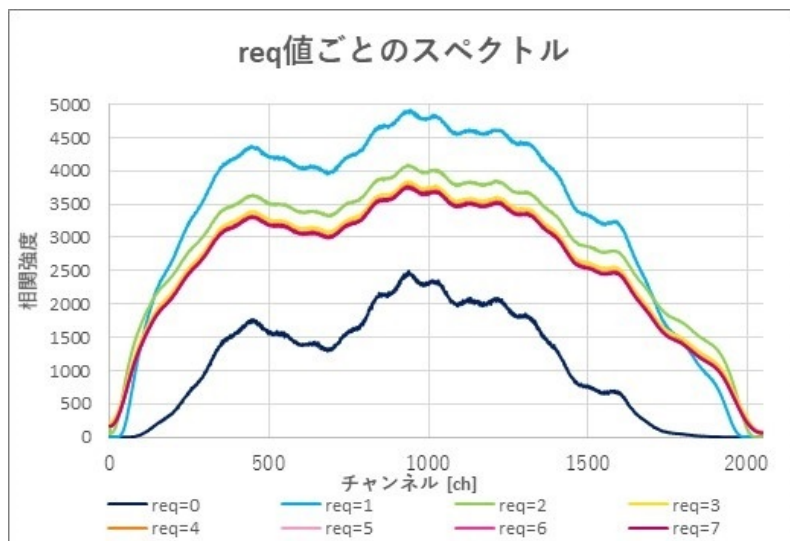


図 5.38: req 値ごとの自己相関スペクトル

これも 1.024 秒の結果である。30 分の平均をとると図 5.39 のようになる。

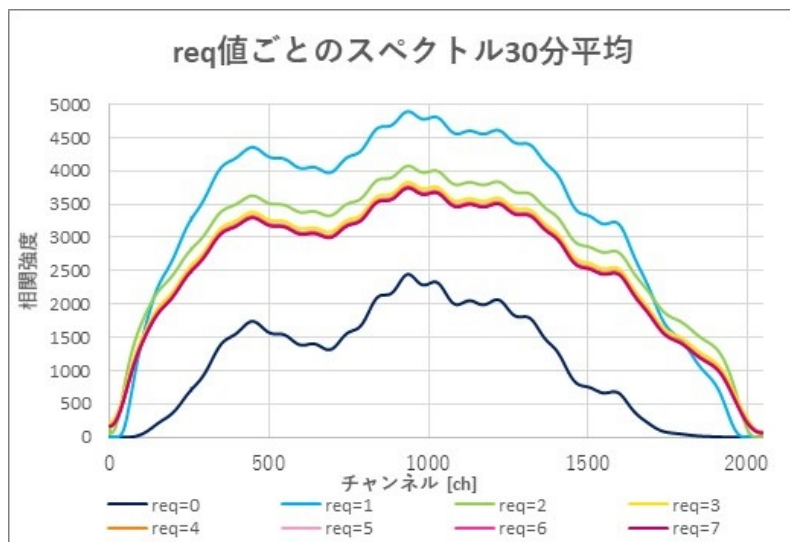


図 5.39: req 値ごとの 30 分平均自己相関スペクトル

これらの測定の開始時刻を表 34 に示す。

表 34: 1218a_1 から 1219c_1 の測定開始時刻

測定コード名	req	測定開始時刻 (UT)
1218a_1	0	2018y 352d 05h 40m 00s
1218b_1	1	2018y 352d 06h 15m 00s
1218c_1	2	2018y 352d 07h 00m 00s
1218d_1	3	2018y 352d 08h 50m 00s
1218e_1	4	2018y 352d 13h 30m 00s
1219a_1	5	2018y 353d 01h 35m 00s
1219b_1	6	2018y 353d 02h 20m 00s
1219c_1	7	2018y 353d 03h 20m 00s

実際、これらの出力は装置のゲインが時間変動することによって変化する。相互相関を取っているわけではないため、このゲインの時間変動の影響は 2 つのアンテナを用いた相互相関強度の結果よりも大きいはずである。だが、以下の図 5.40 から図 5.47 に示すようにこれらの 30 分間の相関強度出力値の時間変動は req = 7 を除いて出力値の 0.2 パーセント未満であり、たまたま変動が大きかった req = 7 でも 3 パーセント未満である。これらの図はすべて自己相関強度をチャンネルで平均した値である。

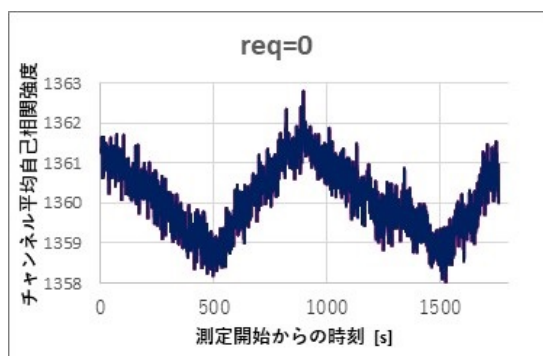


図 5.40: req = 0 の時間変化 (1218a.1)



図 5.41: req = 1 の時間変化 (1218b.1)



図 5.42: req = 2 の時間変化 (1218c.1)



図 5.43: req = 3 の時間変化 (1218d.1)

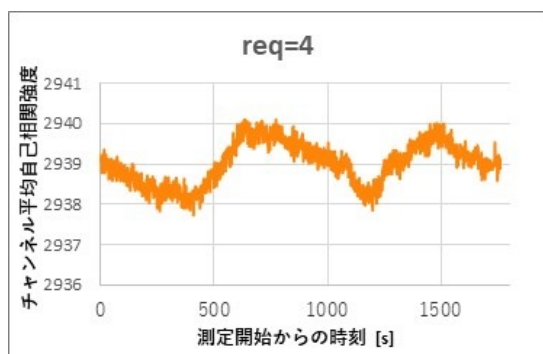


図 5.44: req = 4 の時間変化 (1218e.1)

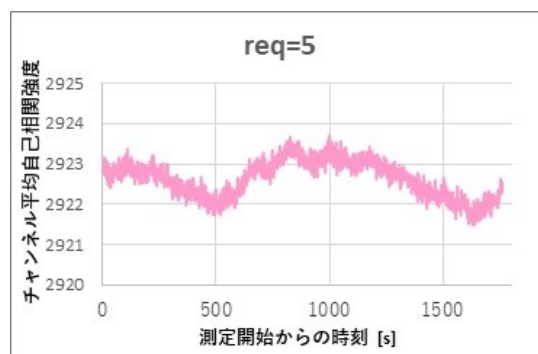


図 5.45: req = 5 の時間変化 (1219a.1)



図 5.46: req = 6 の時間変化 (1219b.1)

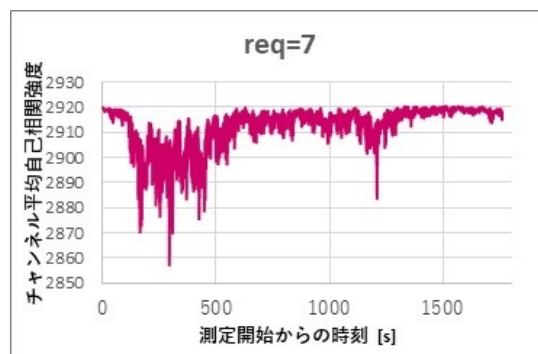


図 5.47: req = 7 の時間変化 (1219c.1)

30 分間の変動が大きくても 5 パーセントに満たないことから、表 34 の測定時刻を考えても、少なくとも隣接する測定では比較ができそうである。よって、“req” の値による違いをある程度は考えられると判断した。勿論、正確な評価のためには各測定前後に基準とする設定での短時間測定を行うなどによる校正が必要である。

これらの測定結果をもとに、以下の議論では各 req 値における再量子化ノイズ及びオーバーフローの影響を、近似直線からのズレや基準のスペクトルからのズレから議論し、さらに実際の観測に近付けて相関強度のチャンネル平均を用いての評価を行う。

議論 1 各 req 値における「再量子化ノイズ」の影響の評価

A/D 変換では、その量子化するビット数に応じた量子化ノイズが発生する。これと似た現象が本相関器の処理過程における再量子化、また出力前のビット切り捨ての際に起こっていると考えられる。このノイズの再量子化によるものを、ここでは「再量子化ノイズ」と呼ぶこととする。この再量子化ノイズを評価する。

評価の方法は以下である。まず、図 5.30 から図 5.37 のスペクトル中で、直線に近似できるチャンネル部分を取り出す。 N を使用するチャンネル数、 i をチャンネル、 y_i をそのチャンネルでの強度、 y_{0i} を直線近似したときのそのチャンネルにおける強度、 $\overline{y_0}$ を近似した直線の範囲内での中央値とすると、

$$\text{SNR} = \frac{\overline{y_0}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|y_i - y_{0i}|^2)}} \quad (5.6)$$

と表される式によってそのチャンネル範囲内の SNR を求めることとした。req 値が小さいものは大きいものに比べて図 5.48 の左図の様子に近くなると考えられるため SNR が悪くなると予想できる。一方で req 値が大きいものはより直線を滑らかに再現できるため SNR が良くなる。

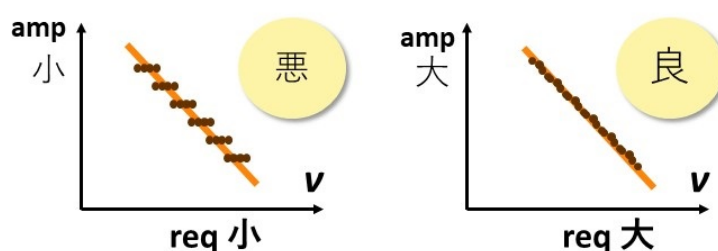


図 5.48: SNR 評価のイメージ 1

ただ、これは傾きの大きい直線に近似できる範囲において行う必要がある。もし図 5.49 のように傾きが 0 に近ければ、むしろ req 値の小さいもののほうが SNR が良くなってしまう可能性があるからだ。

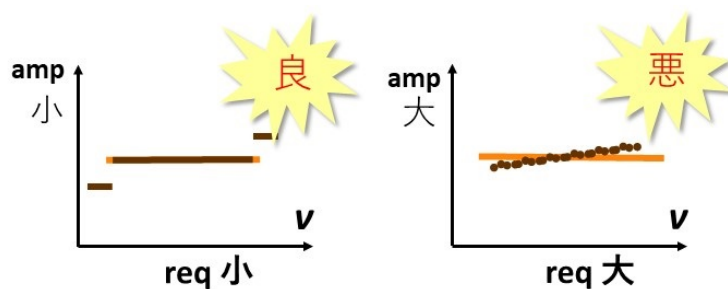


図 5.49: SNR 評価のイメージ 2

実際には、スペクトルが完全に直線となる連続したチャンネル範囲はない。今回は、図 5.30 から図 5.37 のスペクトルから最も直線に近いだろうと判断した 1326 ch から 1375 ch の範囲で SNR を導出した。その結果を図 5.50 に示す。

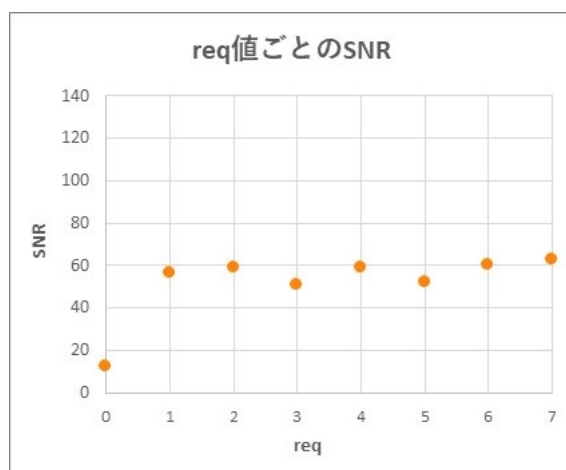


図 5.50: SNR 評価の結果

この結果から、req = 0 以外の結果で SNR は変わらないことが分かった。また、この結果は 1.024 秒積分の結果によるものである。これを 30 分間すべての測定結果を平均したスペクトルによって同様の

ことを行った結果が図 5.51 である。

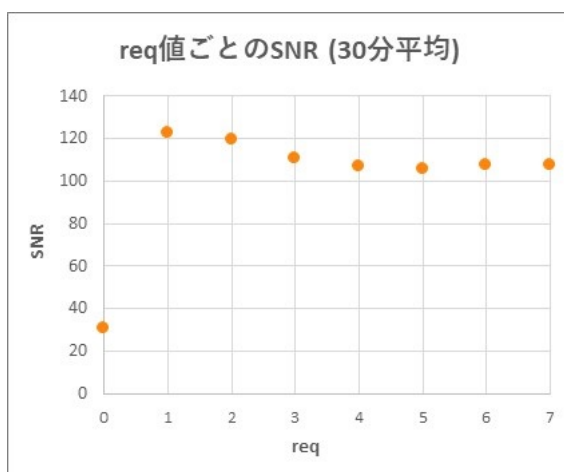


図 5.51: SNR 評価の結果 (30 分積分の結果)

この結果からも、req = 0 以外の結果で SNR は大きく変わらないことが分かった。

一方で、この解析には直線「近似」であるという問題がある。実際のスペクトル、つまり完全に理想的な状態での測定によって得られる真のスペクトルは完全に直線ではない（直線である可能性は非常に低い）。仮に長時間測定を行って平均をとり、真のスペクトルに限りなく近い結果を得られたとしても、図 5.48 の右図のように直線近似からのズレがあるはずである。図 5.48 の左図のような再量子化ノイズが近似直線からの真のスペクトルの差よりも小さければ、ここで求めたい SNR は正確に求められない。よって、再量子化ノイズが近似直線と真のスペクトルの違いよりも小さくなる、ある req 値より大きい場合は近似直線からのスペクトルのズレに埋もれてしまい SNR は一定値になってしまうと予想できる。

以上から、今回の直線近似による SNR 評価の精度では、再量子化ノイズが大きいと判断できるのは req = 0 のときであるが、別の方法でも議論する必要がある。

議論 2 req 値の異なるスペクトルの違い

図 5.52 のように、議論 1 で述べた再量子化ノイズは“req” が小さい程効いてくる可能性がある。そして、“req” が大きくなればなるほど切り捨てられずに残るビット数が多いため測定結果を細かく表現できる。一方で、“req” の大きい値ではオーバーフローの影響が効いている可能性がある。



図 5.52: req 値ごとに起こり得る影響

もっとも、§5.2.1 の解析の結果、今解析している $\text{req} = 7$ 以下ではオーバーフローの影響は殆ど取り除かれていると考えられる。

ここでは、議論 1 において判別しきれなかった $1 \leq \text{req} \leq 7$ のスペクトルのどうし違いを調べる。そのために、以下の方法で決める「基準スペクトル」と「調査スペクトル」の 2 つのスペクトルを比較して「スペクトル相関値」を求めた。

「基準スペクトル」は、30 分間の平均スペクトルを用いる。「調査スペクトル」には 1.024 秒積分の出力スペクトル或いは 10 分間の平均スペクトルを用いる。ある「基準スペクトル」に対して「調査スペクトル」は $0 \leq \text{req} \leq 7$ 全てのスペクトルとする。そのそれぞれで「スペクトル相関値」を導出する。

さらに、これを $0 \leq \text{req} \leq 7$ の「基準スペクトル」すべてに対して行う。よって、 $8 \times 8 = 64$ 通りの比較を行う。

「スペクトル相関値」は、SNR と同様の計算式で求めた。「基準スペクトル」をシグナル、「基準スペクトル」と「調査スペクトル」の違いをノイズと考えて導出した。つまり式 5.6 で y を調査スペクトル、 y_0 を基準スペクトルの強度に対応させて計算した。

ゆえに、例えば図 5.53 のように基準スペクトルと調査スペクトルの形や相関強度の値が近ければ近いほど「スペクトル相関値」は大きくなり、完全一致の場合は無限大になる。逆に、図 5.54 のようにスペクトル形状や相関強度の値が異なれば「スペクトル相関値」は小さくなる。

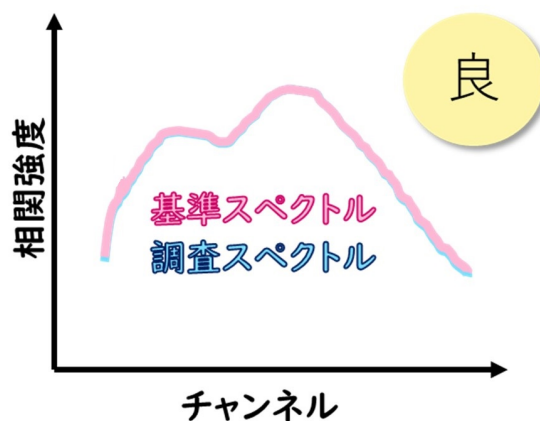


図 5.53: スペクトル相関値が大きくなる例

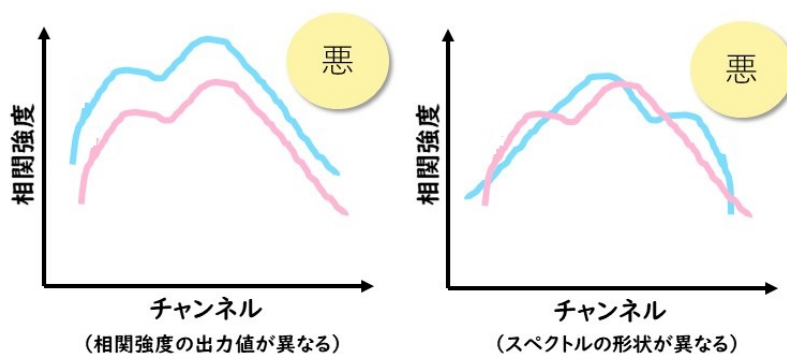


図 5.54: スペクトル相関値が小さくなる例

本議論の SNR 導出には Appendix B の `snr.c` を用いた。

その結果を図 5.55 から図 5.62 に示す。図のタイトルで基準スペクトルとして用いたスペクトルの `req` 値を示している。横軸が調査スペクトルの `req` 値である。1.024 秒の結果はある 1 点 (ここでは測定開始後 5 つ目) の 1.024 秒積分の結果の、10 分の結果はそのとおり 10 分間平均した調査スペクトルと基準スペクトルを比較したものである。10 分の結果では 30 分の測定を 3 分割して 3 つの調査スペクトルを作成し、各調査スペクトルごとに 3 つの 10 分のスペクトル相関値を導出して平均した。エラー

バーは3つのうちの最大値と最小値を示している。

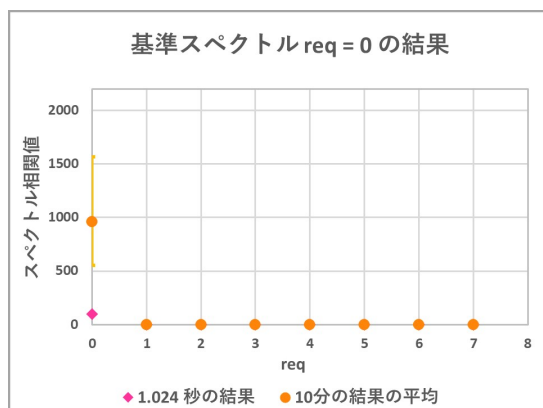


図 5.55: req = 0 の結果

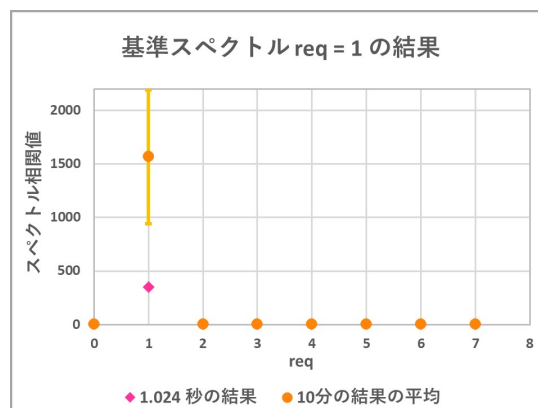


図 5.56: req = 1 の結果

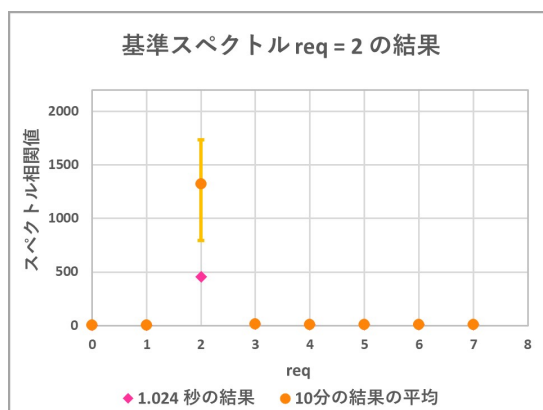


図 5.57: req = 2 の結果

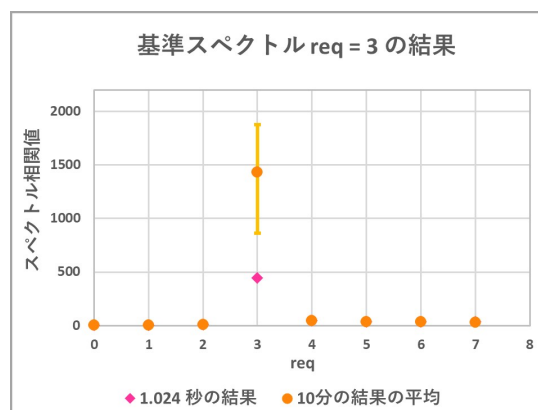


図 5.58: req = 3 の結果

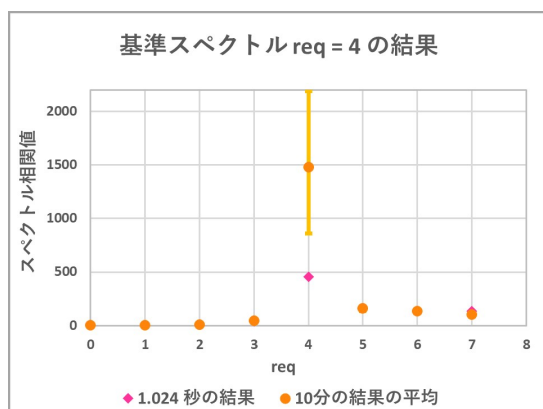


図 5.59: req = 4 の結果

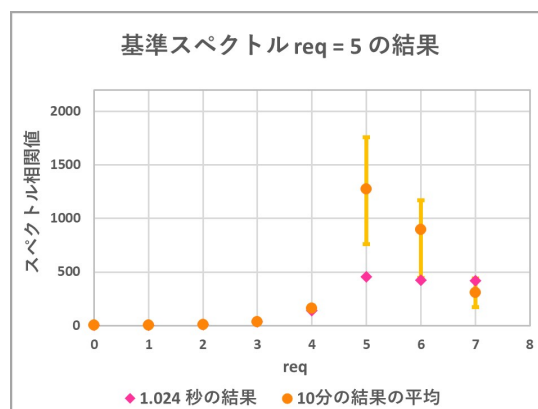


図 5.60: req = 5 の結果

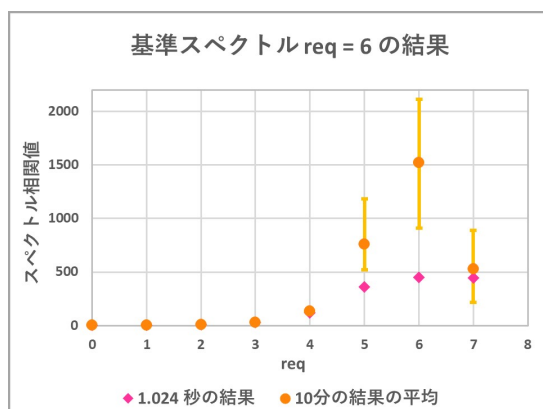


図 5.61: req = 6 の結果

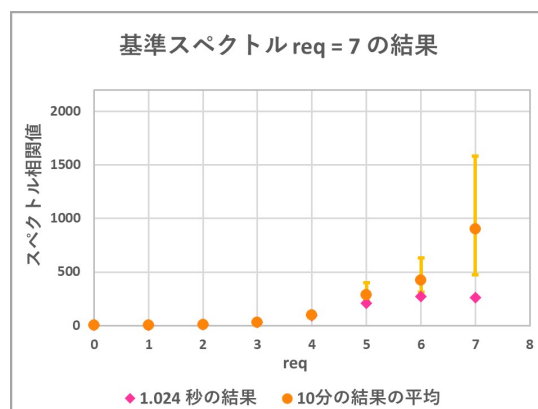


図 5.62: req = 7 の結果

これらの結果は、基準スペクトルが $0 \leq \text{req} \leq 3$ の場合と、 $5 \leq \text{req} \leq 7$ の場合で様相が異なることが分かる。

$0 \leq \text{req} \leq 3$ の場合は基準スペクトルと異なる req 値の調査スペクトルとのスペクトル相関値がほぼ 0 であり、基準スペクトルと同じ req 値の調査スペクトルとのスペクトル相関値だけ値が大きい。

$5 \leq \text{req} \leq 7$ を基準スペクトルとした場合は $0 \leq \text{req} \leq 3$ が調査スペクトルのスペクトル相関値はほぼ 0 であり、 $5 \leq \text{req} \leq 7$ の調査スペクトルとのスペクトル相関値は大きい。 $5 \leq \text{req} \leq 7$ を調査スペクトルとしたときのスペクトル相関値が、特に 1.024 秒の結果ではほぼ同じであることからこれらのスペクトルはとても良く似ていると言える。

基準スペクトルを req = 4 とした結果は、基準スペクトルを $0 \leq \text{req} \leq 3$ としたときの結果と比較すると、 $\text{req} \geq 5$ を調査スペクトルとしたときのスペクトル相関値が大きい。ここから、req = 4 の場合は $5 \leq \text{req} \leq 7$ の 3 つのスペクトルどうし程ではないが、 $5 \leq \text{req} \leq 7$ のスペクトルと似ているだろう

と推測できる。

では、以上の結果を図 5.52 をふまえて考察する。まず、req 値が小さい時は、req 値が小さいほど再量子化ノイズの影響が大きい。req 値が大きくなるごとにスペクトルの形状や相関強度の値は改善されていく。結果と照合すると $0 \leq \text{req} \leq 3$ のときにこの状況であると考えられる。

そして req 値が大きくなるにつれてより詳細にデータを表現できるようになり、相関強度の出力も細かく表現できるようになる。これがある一定の精度に達すると、再量子化ノイズではなく本来のノイズに埋もれてしまい、req 値を大きくしていてもそれ以上精度が上がらず、スペクトルの形状や相関強度の値が変わらなくなる。 $5 \leq \text{req} \leq 7$ ではこのある一定の精度に達していたため、スペクトルの形状や相関強度の出力値がよく似ていたと推測される。

さらに、オーバーフローの影響があったかを考えてみる。オーバーフローの影響は、req 値が大きいほど大きい。もし仮に $\text{req} = 7$ においてオーバーフローの影響が顕著であり、 $\text{req} = 6$ でも少しオーバーフローの影響があったなら、 $5 \leq \text{req} \leq 7$ のスペクトルは相関しないはずである。もし $\text{req} = 7$ だけにオーバーフローの影響があった場合にも $5 \leq \text{req} \leq 7$ で相関することはない。よって、 $\text{req} \leq 7$ ではオーバーフローの影響はない。フラットネス判別値によってオーバーフローの影響を判別できていたことが分かった。

最後に、装置のゲインの時間変動の影響を考察する。表 34 から分かります。特に $0 \leq \text{req} \leq 3$ ではむしろ $5 \leq \text{req} \leq 7$ よりも測定時刻が近接している。もしゲインの変動が激しく、時間と共に有意に変化してしまえば、 $0 \leq \text{req} \leq 3$ よりも $5 \leq \text{req} \leq 7$ で相関が小さくなる可能性が高い。だがそのような結果とならなかったことから、 $5 \leq \text{req} \leq 7$ のスペクトル形状とその出力値の大きさはとてもよく一致している可能性が高い。

議論 3 実際に使用する値の評価

本研究の最終目的である変動電波源のモニター観測では、基本的に今まで複数回提示してきた相互相関スペクトルを横軸のチャンネル方向に平均した結果を用いる予定である。本測定の自己相関スペクトルの結果をこれと同一の方法で計算した場合どうなるかを、議論 3 では評価する。

その結果を横軸に req 値、縦軸に出力自己相関強度のチャンネル平均としてプロットしたものが以下

の図 5.63 から図 5.66 である。

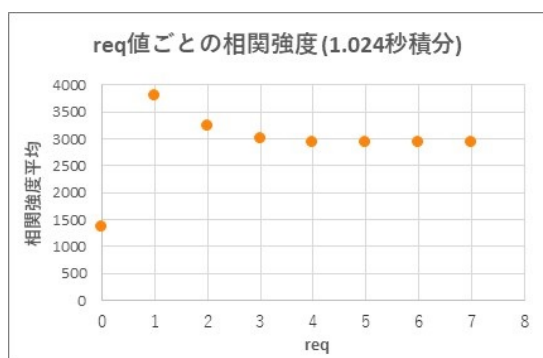


図 5.63: 自己相関チャンネル平均値 (1.024 秒)

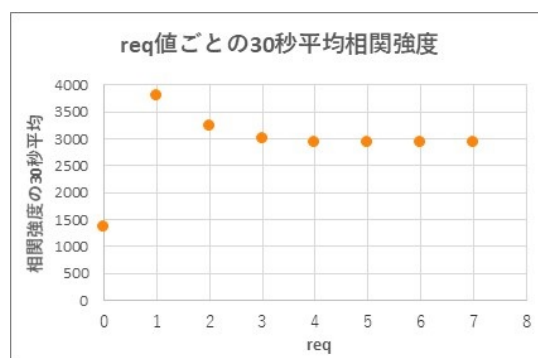


図 5.64: 自己相関チャンネル平均値 (30 秒)

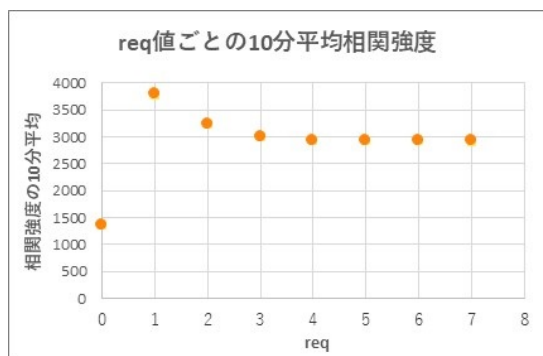


図 5.65: 自己相関チャンネル平均値 (10 分)

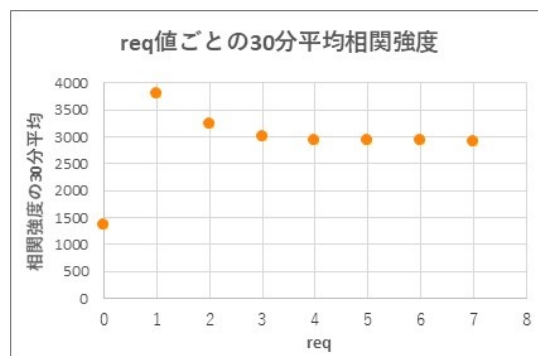


図 5.66: 自己相関チャンネル平均値 (30 分)

以上の結果を見ると、 $\text{req} \geq 3$ では凡そ、 $\text{req} \geq 4$ では殆ど結果が一致していると言える。また、1.024 秒の結果はその 1 秒の結果だけたまたま良かったという可能性も考えられるため、ここでは加えて 3 通りの時間で平均した結果も図 5.64 から図 5.66 に示している。

30 分平均の自己相関強度のチャンネル平均値についての req 値間の違いを評価した結果が以下の表 35 である。これはその表左側の範囲内の req における自己相関強度のチャンネル平均値のなかの、最大値と最小値を使って

$$\frac{\text{自己相関強度のチャンネル平均の最小値}}{\text{自己相関強度のチャンネル平均の最大値}} \times 100[\%] \quad (5.7)$$

の式で導出した。

表 35: 相関強度の大きさの違い

req	相関強度の違い [%]
0-7	84.063
1-7	28.132
2-7	11.040
3-7	2.936
4-7	0.908
5-7	0.348

よって、 $4 \leq \text{req} \leq 7$ の範囲の差は 1 % 以内、 $5 \leq \text{req} \leq 7$ の範囲では 0.4 % 以内であるということになる。

何度も述べているとおりこれらの結果には時間に対する装置のゲイン変動は補正されていないため、ここで示した値は「下限値」である。実際に天体を観測した相互相関の結果を用いてこれと同じ解析方法をとるともっと良い精度になると予想できる。

5.3 本章のまとめ

本章では、相関器の設定値”req”、”scal” がどの範囲で使用可能であるか調べた結果を述べた。

前半ではアンテナを用いた測定により、入力信号強度が最適な状態からどの程度変化するか測定した。モニター観測中に入力信号強度が変化する要因として大きいのは、視野に入る大気の厚みがアンテナのエレベーションにより変化すること、観測する天体の強度はそれぞれ異なることであると考えられる。よって実際にこれらの変化を測定した。その結果、観測に使用するであろう範囲のエレベーション変化では 2 dB、15 Jy 程度の観測天体の強度の違いでは 1 dB 入力信号強度が変化することが分かった。

後半ではホワイトノイズを用いた測定により、どの”req”、”scal”、および入力信号強度で測定可能か、或いはこれらの設定によって発生する誤差が小さいかを評価した。その結果、特に $5 \leq \text{req} \leq 7$ を使用した観測が理想であることが分かった。また、 $4 \leq \text{req} \leq 7$ でも、30 分間の観測結果は 1 % 程度の違いしかないことが分かった。これは req 値が小さいと再量子化ノイズが大きく、オーバーフローの影響がない範囲であれば req 値が大きいほどデータを細かく表現できるためである。req ≥ 8 ではオーバーフローの影響を受けると考えられる。”scal” は”req”によって上限が変化するが、両方の設定値の値が小さいと出力スペクトルが滑らかにならないことが分かった。また、これらの req 値に対して、それぞれ”scal”を最適値に設定することで ± 3 dB の変化に対応可能であることも確認できた。

前述のとおり 3 dB の変化に対応可能ということは、6 GHz 帯、8 GHz 帯において、天気によらず、観測天体の 15 Jy の強度の違いと EL の 15 度から 85 度の変化に設定値を変化することなく対応可能ということになる。今回の結果から ± 3 dB の変化に対応できると分かったため、基準のとり方によって

はさらに大きな天体強度の違いや EL の変化にも対応できる。

これらの結果は今後、相互相関強度の結果を用いて再確認する必要がある。

● 6 ● まとめ

本研究の内容は、変動電波源のモニター観測を見据えた高萩-日立広帯域二素子干渉計の立ち上げである。変動電波源の観測には、広帯域かつ干渉計であり、さらに茨城大学で運用している大口径かつリアルタイムなデータ伝送が可能な本システムが最適である。

この実現のために現状必要なのは、本システム中の相関器出力から実際の強度への変換方法の確立である。そのために、本研究では出力から実際の強度への変換方法の確立と、相関器で必要な設定値による出力値の評価を行った。

変換方法の確立では、100 % の強度変動、つまり 2 倍の強度変化を十分に捉えられる精度のある変換係数を求めることができた。一方で、今回は異常の影響が含まれている可能性が拭えず、さらに天体の強度が文献値から変化している可能性も考えられる。異常の発生原因は本システムのサンプラーであった可能性が高いと判明し、その対策は実施済みであることから、同時に観測天体を別方法で測定することで今後更に高い精度を得られるだろうと期待される。

設定値による出力値の評価では、相関器の処理過程におけるビットシフトの設定値を変更することが出力にどう影響するかをホワイトノイズの測定により調べ、最適な設定値を求めた。2 つある設定値のうちのひとつ “req” は $5 \leq \text{req} \leq 7$ が最適であり、 $4 \leq \text{req} \leq 7$ でも 30 分間測定すると 1 % 以内の誤差となることが分かった。もうひとつの “scal” は “req” の値によって最適値と上限値が変化することが分かり、“req” と “scal” の最適な組み合わせを求めることができた。また、これらの評価はアンテナのエレベーション変化、観測天体の 15 Jy 程度の強度差にも対応できるよう入力信号強度の大きさを変化させての測定についても行い、それらにも十分対応可能であることが分かった。

● 7 ● 今後の展望

変動電波源のモニター観測に欠かせないのは、もちろん茨城大学で運用している高萩局、日立局である。何度も述べているとおり高萩局はモーターの不具合により現在使用を中止しているため、高萩局の修理が本システム実現への最重要事項である。

高萩局の運用が再開したら、本システムについてはまず 2 台のアンテナで天体を観測することによる相互相関を用いて設定値の評価をする必要がある。ホワイトノイズと異なるアンテナの受信信号での相互相関強度の性質の違いから、使用可能な”req” は本研究の結果とほぼ変わらないと考えられるが、”scal” は異なるはずである。

設定値を決定できたら、相関器の出力から実際の強度への変換方法の精度を上げるべく強度既知の天体を観測する必要がある。本研究で参考にした天体の強度から現在やその観測時の天体強度は変化している可能性があるので、可能であれば同時に何等かの方法で観測する天体強度の強度が分かる測定方法での観測ができると良い。これが実現できれば、異常発生が解消されたいま、より精度の良い変換係数の導出が期待できる。

ここまで可能になればモニター観測化は遠くない。現状手動で行っている遅延残差の調整を自動化できれば、日立局で行っているメタノールレーザーのモニター観測のように運用可能であると期待できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり多くの皆様にご指導、ご協力頂きましたこと、大変感謝しております。

特に指導教員の米倉覚則教授には大変お世話になりました。しばしば根拠のない突飛な議論を展開する私の質問や考えに真剣に応えてくださり、納得できるまで間違っている部分を教えてくださいました。自分の実力に見合わない研究会や学会での発表に挑戦させて頂いた際には、研究内容だけでなく英語まで丁寧にアドバイスやご指摘をしてくださいました。またそれらの発表直前には殆ど昼夜関係なくご対応してくださいました。米倉教授にご指導頂いたからこそ、研究を含めそれ以外でも学べたことが非常に多かったと確信しております。

同じく電波天文観測研究室の教授である百瀬宗武教授にも、大変お世話になりました。装置開発に携わられていた経験から、研究に行き詰まったとき相談をさせていただくいつも鋭いご指導をしてくださいました。さらに、大学や大学院の講義、ゼミでの解説が非常に分かりやすく、勉強不足の私にはとても有難かっただけでなく研究発表等の際にどう説明すると分かりやすいかを学ぶこともできました。

研究員の齋藤悠氏、スンカンロウ氏、元茨城大学研究員の杉山孝一郎氏、澤田-佐藤聡子氏、博士後期課程の学生である田辺義浩氏も、日々多くのご迷惑をお掛けしていたにも関わらず懲りずにいつもご指導をしてくださいました。スン氏は毎日研究室の皆に種類豊富なこだわりのお茶を淹れてくださいました。田辺氏は研究室を明るくしてくださいました。また、先輩の石川果奈氏は少ない女性のひとりであり、3年間癒しと安心を与え続けてくださいました。同期の會川航平氏、齋藤偉氏は互いに忙しい学生生活を乗り越えるための戦友と言うに相応しい存在です。水戸を離れた学部時代の同期である西村花菜氏、水野友哉氏に会えることも大学院に進学してからの楽しみでした。そのほか、電波天文観測研究室で関わってくださったみなさま全員のおかげでここまでこの研究を進めてこられました。

他大学では特に、山口大学の藤沢健太教授、新沼浩太郎准教授にお世話になりました。学部4年の際に出張に行かせて頂いて以来、研究会などで発表するといつも様々な視点からご指導、ご意見くださいました。

本研究に関わってくださったかた全員に、心から感謝申し上げます。

最後に、この研究室に入るために関西から茨城への大学進学を許し、さらには大学院への進学も許していつでも助けてくれた両親と祖母、叔母に感謝します。

参考文献

- [1] Osten, R.A., et al. 2005, ApJ, 621, 398
- [2] Ott, M., et al. 1994, A&A, 284, 331
- [3] Yonekura, Y., et al. 2016, PASJ, 68, 74
- [4] Thompson, A.R., Moran, J.M., Swenson Jr, G.W.. 2004, "Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. Second Edition", WILEY - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- [5] 国立天文台編. 2005, 『干渉計サマースクール 2005 教科書』
- [6] 小山勝二 ほか編. 2007, 『ブラックホールと高エネルギー現象 シリーズ現代の天文学 第 8 巻』, 日本評論社
- [7] 田村良明. 2010, 『茨城局のアンテナ座標決定』, 2010 年度 VLBI 懇談会シンポジウム VLBI 懇談会設立 20 周年シンポジウム ～VLBI の現在, 過去, 未来～, p132
- [8] 中井直也 ほか編. 2009, 『宇宙の観測 II 電波天文学 シリーズ現代の天文学 第 16 巻』, 日本評論社
- [9] 福井康雄 ほか編. 2008, 『星間物質と星形成 シリーズ現代の天文学 第 6 巻』, 日本評論社
- [10] 加古琳一. 『日立局・高萩局を結合した二素子干渉計の立ち上げ』, 茨城大学大学院理工学研究科 2015 年度修士論文

Appendix A 関連プログラム一覧

本研究に関連して作成したプログラムのうち、今後活用できる可能性のあるものを一覧にして示す。

表: A.1 作成プログラム一覧

種類	ソースコード名	説明
開口能率補正	calcall.c	vdif_calcで出力されたdatファイルに開口能率補正をする。同じディレクトリ内に観測日の角度ログファイルが必要。テキストファイルと、時間変化のグラフが作成される。
	calcall10.c	calcall.cと同様。出力自己相関強度のみ10分の1にする。
	calcallel.c	calcall.cの位相の代わりにアンテナ仰角を出力する。
	calcallel10.c	calcallel.cと同様。出力自己相関強度のみ10分の1にする。
	calcrm.c	結果から異常データを除去する。他はcalcall.cと同様。相互相関強度が直前200秒の最大値より10%以上低いものを異常データとする。
	calcrm10.c	calcrm.cと同様。出力自己相関強度のみ10分の1にする。
	calcrmel.c	calcrm.cの位相の代わりにアンテナ仰角を出力する。
	calcrm10el.c	calcrmel.cと同様。出力自己相関強度のみ10分の1にする。
	contitacal.c	calcall.cの開口能率を0.6に固定。角度ログファイル不要。
自己相関出力用	auto4.c	4つの自己相関の結果をとりあえず横軸時刻のグラフにする。
スペクトル出力	calsporp.c	vdif_datoutで出力されたテキストファイルから必要なIPのスペクトル（或いは平均スペクトル）を取り出す。
移動平均作成	runmean.c	5 ch移動平均のスペクトルを出力。calsporp.cの出力テキストファイル形式のみに対応。
	runmean7.c	runmean.cの7 chバージョン。
SNR 導出	snr.c	2つのスペクトルのRMS(SNR)を求める。calsporp.cの出力テキストファイル形式のみに対応。

赤字で示しているプログラムのみ、Appendix B にソースコードを記載する。

Appendix B 作成プログラムのコード

ここでは Appendix A に紹介したプログラムのうち、

- calcall.c
- calsporp.c
- snr.c

のソースコードを紹介する。

★ 1. dat ファイルのデータに開口能率を反映させるプログラム ★

加古氏作成の vdif.calc（加古琳一氏 2015 年 修士論文 [10] 参照）にて出力された dat ファイルと、その観測日の高萩局、日立局の角度ログがあるディレクトリ内で実行すると開口能率を補正した出力ファイル、横軸時刻のグラフが出力されるプログラムである。

自己相関 2 つと相互相関の dat ファイル全てが必要であり、まとめてひとつのファイルに出力される。その観測時間の角度情報のみを取り出した角度ファイルも作成される。

ソースコード 1: calcall.c

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <string.h>
4  #include <math.h>
5
6  int main( void )
7  {
8      int fro, numt, numh, numc, lr, sel, freq, numita;
9      int sy, sd, sh, sm, ss, ip, obstime, obsh, obsm, obss, eh, em, es, car;
10     int stime, etime, tangy, tangd, tangt, hangy, hangd, hangt;
11     int tobt, hobt, tobh, hobh, tobm, hobm, tobs, hobs;
12     double ta, tb, ha, hb, ca, cb, itime, num, taz, tel, haz, hel, tita, hita, ctita, chita;
13     double sum=0, ave=0;
14     char infilein[FILENAME_MAX];
15     char infiletangin[FILENAME_MAX], infilehangin[FILENAME_MAX];
16     char infilet[FILENAME_MAX], infileh[FILENAME_MAX], infilec[FILENAME_MAX];
17     char infiletang[FILENAME_MAX], infilehang[FILENAME_MAX];
18     char outfilein[FILENAME_MAX], outfile[FILENAME_MAX];
19     char outfiletang[FILENAME_MAX], outfilehang[FILENAME_MAX];
20     char buf[256]; /* buf256 文字まで */
21     char tangtel[256], t1[256], t2[256], t3[256], tobtts[256], tels[256], titas[256];
22     char hangtel[256], h1[256], h2[256], h3[256], hobts[256], hels[256], hitas[256];
23     char ast[] = "*";
24     FILE *fint, *finh, *finc, *fout, *gp, *ftang, *fhang, *fotang, *fohang;
```

```
25
26
27 /*元ファイルの指定等 */
28
29     printf( "dat ファイル 3 つをまとめて別ファイルに保存し、グラフ化します.\n" );
30
31     /*printf( "UT で日付をまたぐ測定には対応していません.\n" ); */
32     /*printf( "vdif_calc によって出力された dat ファイルを使用してください.\n" ); */
33
34     /*printf( "vdif_calc によって出力された output.dat ファイルは、\n" );
35     printf( "(任意の観測コード名)_ (thread 番号).dat\n" );
36     printf( "のように名前を変更してください.\n" ); */
37
38     /*printf( "このプログラムでは、\n" );
39     printf( "thread1,2を高萩自己相関\n" );
40     printf( "thread3,4を日立自己相関\n" );
41     printf( "thread6,9を相互相関\n" );
42     printf( "と認識します.\n" ); */
43
44     /*printf( "元のファイル名には任意の観測コード名のみを入力してください.\n" );*/
45     printf( "元のファイル名 : " );
46     /* .dat を省いて入力*/
47     scanf( "%s" , infilein );
48
49     /*printf( "thread1,3,6,thread2,4,9のいずれかを選択するとその結果を出力します.\n"
50         ); */
51     printf( "_1,_,_3,_,_6_=>_1_or_,_2,_,_4,_,_9_=>_2_を選んでください。 : " );
52     scanf( "%d",&lr);
53
54 /* 元ファイルを探す。*/
55
56     sel = 0;
57
58     while(sel == 0){
59         if(lr == 1){ /*1,3,6の場合*/
60
61             sprintf(infilet, "%s_1.dat",infilein);
62
63             if( ( fint = fopen( infilet , "r" ) ) == NULL )
64             {
65                 printf( "高萩自己相関の元ファイルが見つかりません%s.dat\n", infilet );
66                 exit( EXIT_FAILURE );
67             }
68
69             sprintf(infileh, "%s_3.dat",infilein);
70
```

```
71     if( ( finh = fopen( infileh , "r" ) ) == NULL )
72     {
73         printf( "日立自己関連の元ファイルが見つかりません□%s.dat\n", infileh );
74         exit( EXIT_FAILURE );
75     }
76
77     sprintf(infilec, "%s_6.dat",infilein);
78
79     if( ( finc = fopen( infilec , "r" ) ) == NULL )
80     {
81         printf( "相互関連の元ファイルが見つかりません□%s.dat\n", infilec );
82         exit( EXIT_FAILURE );
83     }
84
85     sel = 1;
86
87     }else if(lr == 2){ /*2,4,9の場合*/
88
89     sprintf(infilet, "%s_2.dat",infilein);
90
91     if( ( fint = fopen( infilet , "r" ) ) == NULL )
92     {
93         printf( "高萩自己関連の元ファイルが見つかりません□%s.dat\n", infilet );
94         exit( EXIT_FAILURE );
95     }
96
97
98     sprintf(infileh, "%s_4.dat",infilein);
99
100    if( ( finh = fopen( infileh , "r" ) ) == NULL )
101    {
102        printf( "日立自己関連の元ファイルが見つかりません□%s.dat\n", infileh );
103        exit( EXIT_FAILURE );
104    }
105
106
107    sprintf(infilec, "%s_9.dat",infilein);
108
109    if( ( finc = fopen( infilec , "r" ) ) == NULL )
110    {
111        printf( "相互関連の元ファイルが見つかりません□%s.dat\n", infilec );
112        exit( EXIT_FAILURE );
113    }
114
115    sel = 1;
116
117    }else{
```

```
118
119         printf("ちゃんと_1,_3,_6==>_1or_2,_4,_9==>_2で選んでください。:");
120         scanf( "%d",&lr);
121
122     }
123 }
124
125
126 /* dat ファイル上部から必要な情報を読み取る */
127
128     fro = 1;
129     fgets(buf, sizeof(buf), fint);
130     fgets(buf, sizeof(buf), finh);
131     fscanf(finc, "#ObsDate(UT)___:_%04dy_%03dd_%02dh%02dm%02ds", &sy, &sd, &sh, &sm, &
        ss);
132     fgets(buf, sizeof(buf), finc);
133     fro++;
134
135     fgets(buf, sizeof(buf), fint);
136     fgets(buf, sizeof(buf), finh);
137     fscanf(finc, "#IP_length____:_%lf_sec", &itime);
138     fgets(buf, sizeof(buf), finc);
139     fro++;
140
141     while(fro < 6)
142     {
143         fgets(buf, sizeof(buf), fint);
144         fgets(buf, sizeof(buf), finh);
145         fgets(buf, sizeof(buf), finc);
146         fro++;
147     }
148
149     fgets(buf, sizeof(buf), fint);
150     fgets(buf, sizeof(buf), finh);
151     fscanf(finc, "#Total_IP____:_%d", &ip);
152     fgets(buf, sizeof(buf), finc);
153     fro++;
154
155     while(fro < 9)
156     {
157         fgets(buf, sizeof(buf), fint);
158         fgets(buf, sizeof(buf), finh);
159         fgets(buf, sizeof(buf), finc);
160         fro++;
161     }
162
163
```

```
164  /* dat ファイル上部から観測開始・終了時刻を計算する（半端な秒は切り上げ） */
165
166      obstime = ( ip * itime ) + 0.5;
167      obsh = obstime/3600;
168      obsm = ( obstime - ( obsh * 3600 ) )/60;
169      obss = obstime - ( obsh * 3600 ) - ( obsm * 60 );
170
171      es = ss + obss;
172      if( es < 60 ){
173          car = 0;
174      }else{
175          es = es - 60;
176          car = 1;
177      }
178
179      em = sm + obsm + car;
180      if( em < 60 ){
181          car = 0;
182      }else{
183          em = em - 60;
184          car = 1;
185      }
186
187      eh = sh + obsh + car;
188      if( eh < 24 ){
189      }else if ( ( eh == 24 ) && ( em == 0 ) && ( es == 0 ) ){
190      }else{
191          printf( "日付をまたぐ観測のため処理できません。\\n");
192          exit(0);
193      }
194
195      stime = ( sh * 10000 ) + ( sm * 100 ) + ss;
196      etime = ( eh * 10000 ) + ( em * 100 ) + es;
197
198
199  /*出力ファイルの指定 */
200
201      printf("出力ファイル名を指定してください。\\n");
202      printf( "出力ファイル名 : " );
203      /* 拡張子を省いて入力 */
204
205
206  /* 出力ファイルを作って開く */
207
208      scanf( "%s", outfilein );
209      sprintf(outfile, "%s.dat",outfilein);
210      fout = fopen( outfile,"w");
```

```
211
212
213 /* ang 出力ファイルを作って開く*/
214
215     sprintf(outfiletang, "%s_takahagi.ang",outfilein);
216     fotang = fopen( outfiletang,"w");
217
218     sprintf(outfilehang, "%s_hitachi.ang",outfilein);
219     fohang = fopen( outfilehang,"w");
220
221
222 /* ang ファイルの指定と観測周波数帯の指定（η計算に使用）*/
223
224     printf("使用する ang ファイルを指定してください.\n");
225
226     printf( "高萩 ang ファイル名:" );
227     /* .ang を省いて入力*/
228     scanf( "%s" , infiletangin );
229     sprintf(infiletang, "%s.ang",infiletangin);
230
231     if( ( ftang = fopen( infiletang , "r" ) ) == NULL ){
232         printf( "高萩 ang ファイルが見つかりません%s.ang\n", infiletangin );
233         exit( EXIT_FAILURE );
234     }
235     fclose(ftang);
236
237     printf( "日立 ang ファイル名:" );
238     /* .ang を省いて入力*/
239     scanf( "%s" , infilehangin );
240     sprintf(infilehang, "%s.ang",infilehangin);
241
242     if( ( fhang = fopen( infilehang , "r" ) ) == NULL ){
243         printf( "日立 ang ファイルが見つかりません%s.ang\n", infilehangin );
244         exit( EXIT_FAILURE );
245     }
246     fclose(fhang);
247
248     sel = 0;
249
250     printf( "観測周波数帯を指定してください. \n" );
251     printf( "6GHz=>6,8GHz=>8or22GHz=>22を選んでください.:" );
252     scanf( "%d",&freq);
253
254     while( sel == 0 ){
255
256         if( freq == 6 ){
257             sel = 1;
```

```
258     }else if( freq == 8 ){
259         sel = 1;
260     }else if( freq == 22 ){
261         sel = 1;
262     }else{
263         printf("ちゃんと\n");
264         printf("6GHz=>6, 8GHz=>8 or 22GHz=>22で選んでください。:");
265         scanf( "%d",&freq);
266     }
267 }
268
269
270 /* ang ファイルの作成 */
271 /* ang ファイルは、高萩・日立それぞれ year day time(時・分・秒 6桁) 開始からの秒 EL η となります。*/
272
273 /*高萩 ang*/
274 if((ftang = fopen( infiletang , "r" )) != NULL){
275     while(fgets(tangtel, 256, ftang ) !=NULL){
276
277         sscanf( tangtel, "%s%s%s", t1, t2, t3);
278
279         if(strstr(t1,ast)!=NULL){
280             }else{
281
282                 sscanf( t1, "%4d%3d%6d", &tangy, &tangd, &tangt);
283                 sscanf( t2, "%lf", &taz);
284                 sscanf( t3, "%lf", &tel);
285
286                 if( tangt < stime ){
287                     }else if( ( tangt > ( stime - 1 ) ) && ( tangt < ( etime + 1 ) ) ){
288
289                         tobh = tangt/10000;
290                         tobm = ( tangt - (tobh*10000) )/100;
291                         tobs = tangt - (tobh*10000) - (tobm*100);
292                         car = 0;
293
294                         if( tobs < ss){
295                             tobs = tobs + 60 - ss;
296                             car = 1;
297                         }else{
298                             tobs = tobs - ss;
299                             car = 0;
300                         }
301
302                         tobm = tobm - car;
303                         car = 0;
```

```
304
305         if( tobm < sm){
306             tobm = tobm + 60 - sm;
307             car = 1;
308         }else{
309             tobm = tobm - sm;
310             car = 0;
311         }
312
313         tobh = tobh - sh - car;
314
315         tobt = (tobh * 3600) + (tobm * 60) + tobs;
316
317
318         if( freq == 6 ){
319
320             /* 高萩 8GHz RHCP */
321             tita = (4.53 * pow(10,-7) * ((tel)*(tel)*(tel)))
322                   - (8.13 * pow(10,-5) * ((tel)*(tel)))
323                   + (3.98 * pow(10,-3) * (tel)) + 0.535;
324
325         }else if( freq == 8){
326
327             /* 高萩 8GHz RHCP */
328             tita = (4.53 * pow(10,-7) * ((tel)*(tel)*(tel)))
329                   - (8.13 * pow(10,-5) * ((tel)*(tel)))
330                   + (3.98 * pow(10,-3) * (tel)) + 0.535;
331
332         }else if( freq == 22){
333
334             /* 高萩 8GHz RHCP */
335             tita = (4.53 * pow(10,-7) * ((tel)*(tel)*(tel)))
336                   - (8.13 * pow(10,-5) * ((tel)*(tel)))
337                   + (3.98 * pow(10,-3) * (tel)) + 0.535;
338
339         }else{
340
341             /* 高萩 8GHz RHCP */
342             tita = (4.53 * pow(10,-7) * ((tel)*(tel)*(tel)))
343                   - (8.13 * pow(10,-5) * ((tel)*(tel)))
344                   + (3.98 * pow(10,-3) * (tel)) + 0.535;
345
346         }
347
348         /* 高萩は 8GHz RHCP 以外未測定。*/
349
```



```
350         fprintf( fotang, "%04d_%03d_%06d_%05d%.4lf_%1f_\n", tangy, tangd,
351                 tangt, tobt, tel, tita);
352     }else if( tangt > etime ){
353     }else{
354     }
355 }}
356
357
358 /*日立 ang*/
359 if((fhang = fopen( infilehang , "r" )) != NULL){
360 while(fgets(hangtel, 256, fhang ) !=NULL){
361
362     sscanf( hangtel, "%s_%s_%s", h1, h2, h3);
363     if(strstr(h1,ast)!=NULL){
364     }else{
365
366     sscanf( h1, "%4d%3d%6d", &hangy, &hangd, &hangt);
367     sscanf( h2, "%1f", &haz);
368     sscanf( h3, "%1f", &hel);
369
370     if( hangt < stime ){
371     }else if( ( hangt > ( stime - 1 ) ) && ( hangt < ( etime + 1 ) ) ){
372
373         hobb = hangt/10000;
374         hobm = ( hangt - (hobb*10000) )/100;
375         hobs = hangt - (hobb*10000) - (hobm*100);
376         car = 0;
377
378         if( hobs < ss){
379             hobs = hobs + 60 - ss;
380             car = 1;
381         }else{
382             hobs = hobs - ss;
383             car = 0;
384         }
385
386         hobm = hobm - car;
387         car = 0;
388
389         if( hobm < sm){
390             hobm = hobm + 60 - sm;
391             car = 1;
392         }else{
393             hobm = hobm -sm;
394             car = 0;
395         }
}
```

```
396
397     hobb = hobb - sh - car;
398
399     hobt = (hobb * 3600) + (hobm * 60) + hobs;
400
401
402     if( freq == 6 ){
403
404         /* 日立 6GHz LHCP */
405         hita = (7.51 * pow(10,-7) * ((hel)*(hel)*(hel)))
406             - (1.14 * pow(10,-4) * ((hel)*(hel)))
407             + (2.75 * pow(10,-3) * (hel)) + 0.718;
408
409     }else if( freq == 8){
410
411         /* 日立 8GHz RHCP */
412         hita = (1.06 * pow(10,-6) * ((hel)*(hel)*(hel)))
413             - (1.72 * pow(10,-4) * ((hel)*(hel)))
414             + (4.99 * pow(10,-3) * (hel)) + 0.670;
415
416     }else if( freq == 22){
417
418         /* 日立 8GHz RHCP */
419         hita = (1.06 * pow(10,-6) * ((hel)*(hel)*(hel)))
420             - (1.72 * pow(10,-4) * ((hel)*(hel)))
421             + (4.99 * pow(10,-3) * (hel)) + 0.670;
422
423     }else{
424
425         /* 日立 8GHz RHCP */
426         hita = (1.06 * pow(10,-6) * ((hel)*(hel)*(hel)))
427             - (1.72 * pow(10,-4) * ((hel)*(hel)))
428             + (4.99 * pow(10,-3) * (hel)) + 0.670;
429
430     }
431
432
433     /* 日立は 6・8GHz とも両偏波測定済のため、必要であれば以下に書き換えてください。
434
435     ---日立 6GHz LHCP---
436     hita = (7.51 * pow(10,-7) * ((hel)*(hel)*(hel)))
437         - (1.14 * pow(10,-4) * ((hel)*(hel)))
438         + (2.75 * pow(10,-3) * (hel)) + 0.718;
439
440     ---日立 6GHz RHCP---
441     hita = (5.56 * pow(10,-7) * ((hel)*(hel)*(hel)))
442         - (8.87 * pow(10,-5) * ((hel)*(hel)))
```

```

443         + (2.27 * pow(10,-3) * (hel)) + 0.706;
444
445     ---日立 8GHz LHCP---
446     hita = (1.38 * pow(10,-6) * ((hel)*(hel)*(hel)))
447           - (2.08 * pow(10,-4) * ((hel)*(hel)))
448           + (6.62 * pow(10,-3) * (hel)) + 0.658;
449
450     ---日立 8GHz RHCP---
451     hita = (1.06 * pow(10,-6) * ((hel)*(hel)*(hel)))
452           - (1.72 * pow(10,-4) * ((hel)*(hel)))
453           + (4.99 * pow(10,-3) * (hel)) + 0.670;
454 */
455
456     fprintf( fohang, "%04d_%03d_%06d_%05d%.4lf_%1f\n", hangy, hangd,
457             hangt, hobt, hel, hita);
458
459     }else if( hangt > etime ){
460     }else{
461     }}
462
463     fclose(ftang);
464     fclose(fhang);
465     fclose(fotang);
466     fclose(fohang);
467
468
469     /*dat ファイルから読み取り、開口能率を補正して出力 dat ファイル作成*/
470
471     while(
472     (fscanf(fint, "%d_%1f_%1f", &numt, &ta, &tb) !=EOF) &&
473     (fscanf(finh, "%d_%1f_%1f", &numh, &ha, &hb) !=EOF) &&
474     (fscanf(finc, "%d_%1f_%1f", &numc, &ca, &cb) !=EOF))
475     {
476
477
478         num = numc * itime;
479         numita = num + 0.5;
480
481         sel = 0;
482
483         if((fotang = fopen( outfiletang , "r" )) != NULL){
484             while(fgets(tangtel, 256, fotang ) !=NULL){
485
486                 sscanf( tangtel, "%s_%s_%s_%s_%s", t1, t2, t3, tobts, tels, titas);
487                 sscanf( tobts, "%d", &tobt);
488                 sscanf( titas, "%1f", &tita);

```

```
489
490         if( tobt == numita ){
491             ctita = tita;
492             sel++;
493         }else if( tobt < numita ){
494             ctita = tita;
495             sel++;
496         }else if( sel == 0 ){
497             ctita = tita;
498             sel++;
499         }
500     }}
501
502     fclose(fotang);
503
504     if( sel == 0 ){
505         ctita = 0.6;
506     }
507
508
509     sel = 0;
510
511     if((fohang = fopen( outfilehang , "r" )) != NULL){
512         while(fgets(hangtel, 256, fohang ) !=NULL){
513
514             sscanf( hangtel, "%s_%s_%s_%s_%s", h1, h2, h3, hobts, hels, hitas);
515             sscanf( hobts, "%d", &hobt);
516             sscanf( hitas, "%lf", &hita);
517
518             if( hobt == numita ){
519                 chita = hita;
520                 sel++;
521             }else if( hobt < numita ){
522                 chita = hita;
523                 sel++;
524             }else if( sel == 0 ){
525                 chita = hita;
526                 sel++;
527             }
528         }}
529
530     fclose(fotang);
531
532     if( sel == 0 ){
533         chita = 0.6;
534     }
535
```

```

536      /*ang ログに一致する時刻がない場合、直前の時刻の $\eta$ を反映します。*/
537      /*当該時刻以前の観測時刻内にログがない場合は直後の $\eta$ を反映します。*/
538
539      ta = ta / ctita;
540      ha = ha / chita;
541      ca = ca / ( sqrt( ctita * chita ) );
542      sum += ca;
543
544      fprintf( fout, "%lf%lf%lf%lf%lf\n", num, ta, ha, cb, ca);
545
546  }
547
548  fclose(fint);
549  fclose(finh);
550  fclose(finc);
551  fclose(fout);
552
553  ave = sum / ip;
554  printf( "相互相関強度の平均は%.6lfでした。 \n", ave );
555
556
557  /*グラフの作成*/
558
559  gp = popen("gnuplot-persist","w");
560  fprintf(gp, "set title '%s' noenhanced font \"NewCenturySchlbk-Bold,36\" \n",
561          outfilein);
562  fprintf(gp, "set object 1 rect behind from screen 0,0 to screen 1,1 fillc rgb \"
563          white\" fillstyle solid 1.0 \n");
564  fprintf(gp, "set xrange[0:] \n");
565  fprintf(gp, "set ytics nomirror \n");
566  fprintf(gp, "set y2tics \n");
567  fprintf(gp, "set yrange[0:] \n");
568  fprintf(gp, "set y2range[-180:180] \n");
569  fprintf(gp, "set xlabel 'time[s] (start time: %04dy%03dd%02dh%02dm%02ds (UT))' \n",
570          font \ "NewCenturySchlbk-Bold,18\" \n", sy, sd, sh, sm, ss);
571  fprintf(gp, "set ylabel 'amp' font \"NewCenturySchlbk-Bold,18\" \n");
572  fprintf(gp, "set y2label 'phase[deg]' font \"NewCenturySchlbk-Bold,18\" \n");
573  fprintf(gp, "set key opaque \n");
574  fprintf(gp, "set key below \n");
575  fprintf(gp, "set keybox lw 0.01 lc rgb 'grey40' font \"NewCenturySchlbk-Bold
576          ,18\" textcolor rgb 'grey40' width +5 height +1 spacing 1.2 \n");
577  fprintf(gp, "plot '%s' u 1:2 w l lt -1 lc rgb 'light-pink' lw 3 title 'takahagi
578          autocor', '%s' u 1:3 w l lt -1 lc rgb '#ffdd00' lw 3 title 'hitachi
579          autocor', '%s' u 1:4 w l lt -1 lc rgb 'grey70' lw 3 axis x1y2 title '
580          phase', '%s' u 1:5 w l lt -1 lc rgb '#ff8800' lw 3 title 'crosscor' \n",
581          outfile, outfile, outfile, outfile);
582

```

```

575     fprintf(gp, "set_terminal_postscript_eps_enhanced_color\n");
576     fprintf(gp, "set_output\\\"%s.eps\\\"\\n", outfilein);
577     fprintf(gp, "replot\n");
578
579     pclose(gp);
580
581     return EXIT_SUCCESS;
582
583
584 }

```

★ 2. 指定した時刻で平均したスペクトル導出プログラム ★

加古氏作成の `vdif_datout` (加古琳一氏 2015 年 修士論文 [10] 参照) にて出力された `txt` ファイルから、指定した IP 内の強度と位相をチャンネルごとに時間平均してスペクトルを出力するプログラムである。指定時刻の開始と終了を同じにするとその IP のスペクトルを取り出せる。観測時間全ての平均と指定することも可能である。

ソースコード 2: `calsporp.c`

```

1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <string.h>
4  #include <math.h>
5
6  int main( void )
7  {
8      int fro, ip, ips, ipe, i, j, k, l;
9      int num, amp, pha , ipa;
10     double suma[2048]={0}, avea[2048]={0};
11     double sump[2048]={0}, avep[2048]={0};
12     char infilein[FILENAME_MAX], infile[FILENAME_MAX];
13     char outfilein[FILENAME_MAX], outfile[FILENAME_MAX];
14     char buf[256];
15     /* buf256 文字まで, ip 数 32 文字まで */
16     FILE *fin, *fout, *gp;
17
18     /* ファイルの指定 */
19     printf( "チャンネルごとに振幅・位相の時間平均をとるプログラムです。\\n" );
20     printf( "vdif_datout によって出力された txt ファイル名を指定してください。\\n" );
21
22     printf( "ファイル名: " );
23     /* .txt を省いて入力 */
24     scanf( "%s" , infilein );
25

```

```
26     sprintf(infile, "%s.txt",infilein);
27
28     if( ( fin = fopen( infile , "r" ) ) == NULL )
29     {
30         printf( "元ファイルが見つかりません%s.txt\n", infile );
31         exit( EXIT_FAILURE );
32     }
33
34
35     /* ファイル上部からの情報読み取りとIP の指定 */
36     fro = 0;
37
38     while(fro < 5)
39     {
40         fgets(buf, sizeof(buf), fin);
41         fro++;
42     }
43
44     fscanf(fin, "#Total_IP: %d", &ipa);
45
46     fgets(buf, sizeof(buf), fin);
47     fgets(buf, sizeof(buf), fin);
48
49     printf("このデータの IP 数は %d です。 \n");
50     printf("全 IP 平均=>1 or 指定IP 平均=>2 を選んでください。 \n", ipa);
51     scanf( "%d",&k);
52
53     l = 0;
54
55     while(l == 0){
56         if(k == 1){
57
58             ips = 1;
59             ipe = ipa;
60             l = 1;
61
62         }else if (k == 2){
63
64             printf("開始 IP :");
65             scanf( "%d", &ips);
66
67             printf("終了 IP :");
68             scanf("%d", &ipe);
69
70             l = 1;
71
72         }else{
```

```
73
74     printf("ちゃんと全 IP 平均==>1□or□指定IP 平均==>2□で選んでください。 \n");
75     scanf( "%d",&k);
76
77     }
78     }
79
80
81     /*出力ファイルの指定*/
82     printf( "出力ファイル名 : " );
83     /* .txt を省いて入力 */
84     scanf( "%s", outfilein );
85     sprintf(outfile, "%s.txt",outfilein);
86
87
88     /*必要部分の読み込みと足し算*/
89     fout = fopen( outfile,"w");
90
91     j = 1;
92     ip = ipa +1;
93
94     while(j < ip){
95
96         if((ips-1<j)&&(j<ipe+1))
97         {
98
99             fro = 0;
100             while(fro < 5)
101             {
102                 fgets(buf, sizeof(buf), fin);
103                 fro++;
104             }
105
106             i = 0;
107             while(i < 2048)
108             {
109                 fscanf(fin, "%d\t%d\t%d\n", &num, &amp, &pha);
110                 suma[i] += amp;
111                 sump[i] += pha;
112
113                 if(j == ipe){
114                     avea[i] = (suma[i])/(ipe-ips+1);
115                     avep[i] = (sump[i])/(ipe-ips+1);
116                     fprintf(fout, "%d\t%lf\t%lf\n", num, avea[i], avep[i]);
117                 }
118                 i++;
119             }
```



```
120
121     fro = 0;
122     while(fro < 2049)
123     {
124         fgets(buf, sizeof(buf), fin);
125         fro++;
126     }
127
128     j++;
129
130     }else{
131
132     fro = 0;
133     while(fro < 4102)
134     {
135         fgets(buf, sizeof(buf), fin);
136         fro++;
137     }
138
139     j++;
140     }
141
142     }
143
144
145     /*スペクトルの作成*/
146     fclose(fin);
147     fclose(fout);
148
149     gp = popen("gnuplot-persist","w");
150     fprintf(gp, "set title '%s' noenhanced font \"NewCenturySchlbk-Bold,36\" \n",
151             outfilein);
152     fprintf(gp, "set object 1 rect behind from screen 0,0 to screen 1,1 fc rgb \"
153             white\" fillstyle solid 1.0 \n");
154     fprintf(gp, "set xrange[0:2047] \n");
155     fprintf(gp, "set ytics nomirror \n");
156     fprintf(gp, "set y2tics \n");
157     fprintf(gp, "set yrange[0:] \n");
158     fprintf(gp, "set y2range[-180:180] \n");
159     fprintf(gp, "set xlabel 'Channel[ch]' font \"NewCenturySchlbk-Bold,12\" \n");
160     fprintf(gp, "set ylabel 'Amplitude' font \"NewCenturySchlbk-Bold,12\" \n");
161     fprintf(gp, "set y2label 'Phase[degree]' font \"NewCenturySchlbk-Bold,12\" \n"
162             );
163     fprintf(gp, "set tics font \"Helvetica,10\" \n");
164     fprintf(gp, "set key opaque \n");
165     fprintf(gp, "set key center bottom \n");
```

```

163     fprintf(gp, "set_key_box_lw_0.01_lc_rgb_grey40'font_\"NewCenturySchlbk-Bold
    ,22\"_textcolor_rgb_grey40'width_+7_height_+1_spacing_1.2_\\n");
164     fprintf(gp, "plot_'s'_u_1:3_w_l_l_t_1_l_w_2_l_c_rgb_green'_axis_x1y2_title_'Phase
    ', '%s'_u_1:2_w_l_l_t_1_l_w_2_l_c_rgb_red'_axis_x1y1_title_'Amplitude'_\\n",
        outfile, outfile);
165     fprintf(gp, "set_terminal_postscript_eps_enhanced_color_\\n");
166     fprintf(gp, "set_output_\"%s.eps\"_\\n", outfilein);
167     fprintf(gp, "replot_\\n");
168
169     pclose(gp);
170
171     return EXIT_SUCCESS;
172
173
174 }

```

★ 3. SNR 導出プログラム ★

シグナルとする基準ファイルとノイズとする調査ファイルを指定すると、SNR を計算して出力するグラフ。本論文 §5.2 にて使用したため記載する。

ソースコード 3: snr.c

```

1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <string.h>
4  #include <math.h>
5
6  int main( void )
7  {
8      int ch, num;
9      int ach=2048;
10     double sum=0, ave=0;
11     double samp, namp, spha, npha, ampd=0, sq=0, snr;
12     char infiles[FILENAME_MAX], infiles[FILENAME_MAX];
13     char infileinn[FILENAME_MAX], infilen[FILENAME_MAX];
14     /* buf256 文字まで, ip 数 32 文字まで */
15     FILE *fins, *finn;
16
17     /*ファイルの指定*/
18     printf( "これは基準ファイルと調査ファイルの 2つを選択すると、\\n");
19     printf( "基準ファイルを S, 調査ファイルを N として SNR を求めるプログラムです。\\n" );
20     printf( "2048チャンネルとそれに対する強度のみが\\n" );
21     printf( "2列で記録されているtxt ファイル名を指定してください。\\n" );
22

```

```
23     printf( "基準ファイル名 : " );
24     /* .txt を省いて入力*/
25     scanf( "%s" , infileins );
26
27     sprintf(infileins, "%s.txt",infileins);
28
29     if( ( fins = fopen( infileins , "r" ) ) == NULL )
30     {
31         printf( "基準ファイルが見つかりません\n%s.txt\n", infileins );
32         exit( EXIT_FAILURE );
33     }
34
35     printf( "調査ファイル名 : " );
36     /* .txt を省いて入力*/
37     scanf( "%s" , infileinn );
38
39     sprintf(infileinn, "%s.txt",infileinn);
40
41     if( ( finn = fopen( infileinn , "r" ) ) == NULL )
42     {
43         printf( "調査ファイルが見つかりません\n%s.txt\n", infileinn );
44         exit( EXIT_FAILURE );
45     }
46
47
48     /*SNR の計算*/
49     ch = 0;
50
51     while(ch < 2048)
52     {
53         fscanf(fins, "%d\t%lf\t%lf\n", &num, &samp, &spha);
54         fscanf(finn, "%d\t%lf\t%lf\n", &num, &namp, &npha);
55
56         ampd = fabs( samp - namp );
57         sq = pow(ampd, 2);
58         sum = sum + sq;
59         ave = ave + samp;
60
61         ch++;
62     }
63
64     fclose(fins);
65     fclose(finn);
66
67     if(sum == 0){
68         printf( "SNR は完璧です!\n", snr );
69     }else{
```

```
70         snr = ( ave / ach ) / ( sqrt( sum / ach ) );
71         printf( "SNR は%fです!\n", snr );
72     }
73
74     return EXIT_SUCCESS;
75
76
77 }
```

Appendix C 異常データと α 導出のための異常データ除去方法

ここでは、4 章で述べた異常データを含んだ結果は、以下に赤字で示す観測である。

表: A.2 強度既知天体の観測一覧
(赤字は異常データを記録したもの)

観測コード名	観測天体	観測開始時刻 (UT)
20170609c	3C123	2017y 160d 03h 50m 00s
20170610b	3C161	2017y 161d 02h 45m 00s
20170610j	3C161	2017y 161d 07h 15m 00s
20170610m	3C286	2017y 161d 09h 00m 00s
20170610r	3C286	2017y 161d 12h 00m 00s
20170611e	3C123	2017y 162d 01h 10m 00s
20170611f	3C48	2017y 162d 02h 05m 00s
20170611r	3C161	2017y 162d 07h 05m 00s
20170612f	3C48	2017y 163d 20h 13m 00s
20170612g	3C48	2017y 163d 20h 45m 00s
20170612j	3C48	2017y 163d 21h 32m 00s
20170612k	3C123	2017y 163d 22h 10m 00s
20170612l	3C123	2017y 163d 22h 44m 00s
20170613a	3C123	2017y 164d 00h 00m 00s
20170613f	3C286	2017y 164d 09h 10m 00s
20170613g	3C286	2017y 164d 09h 45m 00s
20170613i	3C286	2017y 164d 10h 25m 00s

まず、これらの補正前と補正後の結果を示す。補正後の結果は §4.1 で記載したものと同一である。

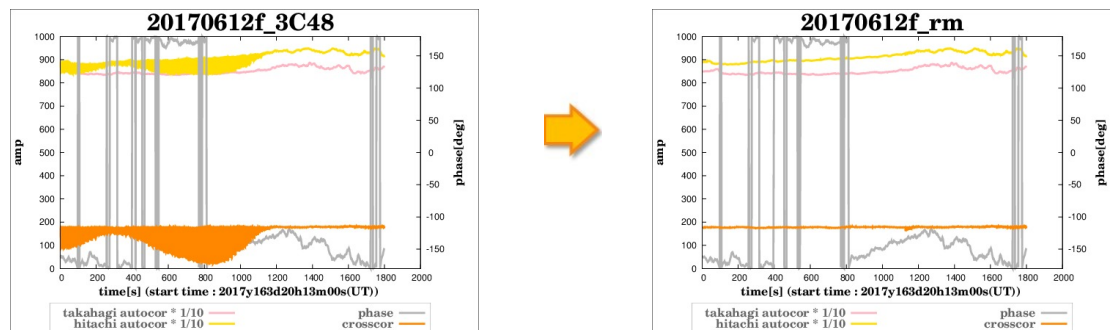


図: A.1 3C48(20170612f) の補正前 (左) と補正後 (右, 図 4.2 と同様)

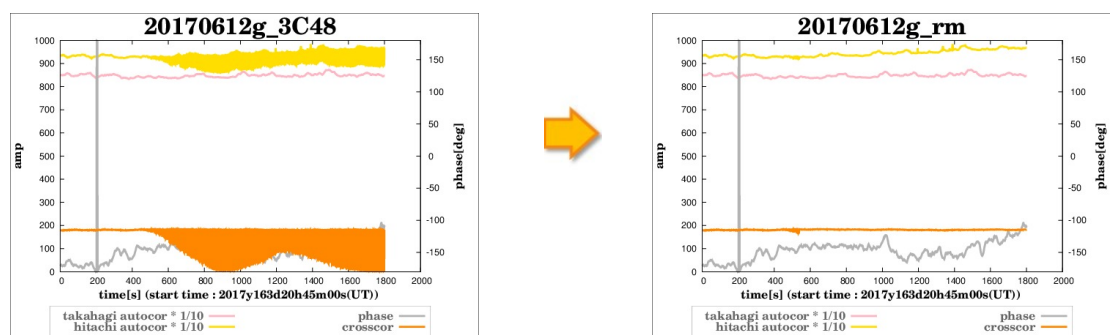


図: A.2 3C48(20170612g) の補正前 (左) と補正後 (右, 図 4.3 と同様)

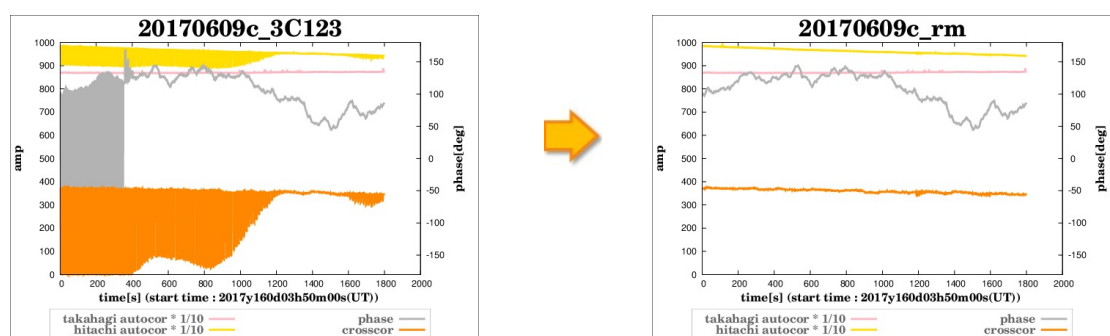


図: A.3 3C123(20170609c) の補正前 (左) と補正後 (右, 図 4.5 と同様)

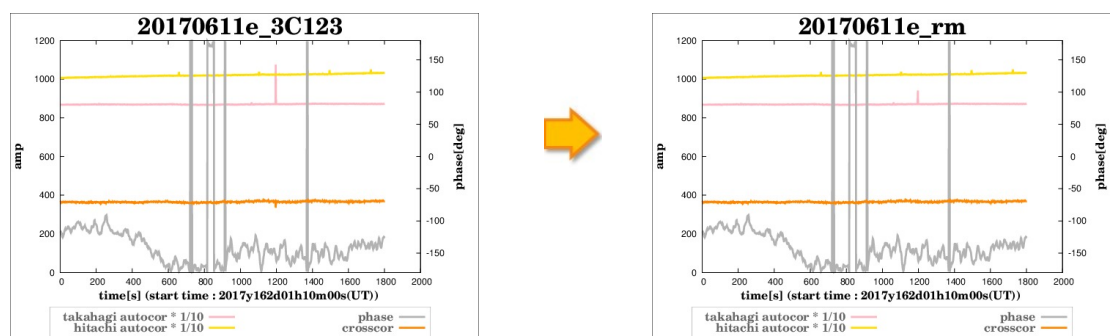


図: A.4 3C123(20170611e) の補正前 (左) と補正後 (右, 図 4.9 と同様)

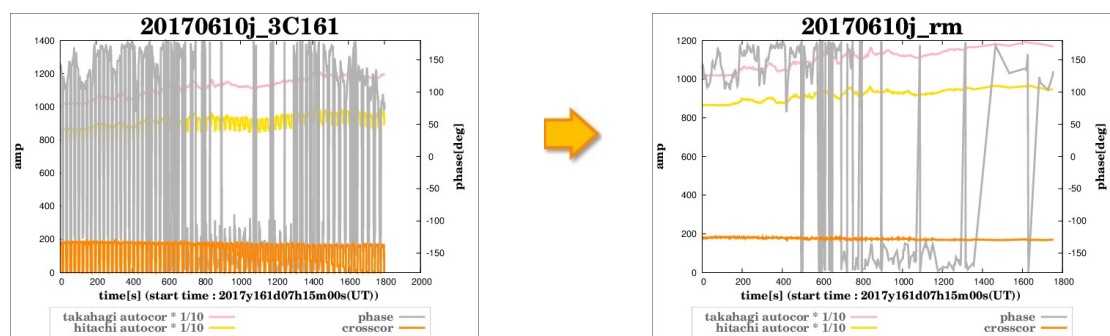


図: A.5 3C161(20170610j) の補正前 (左) と補正後 (右, 図 4.16 と同様)

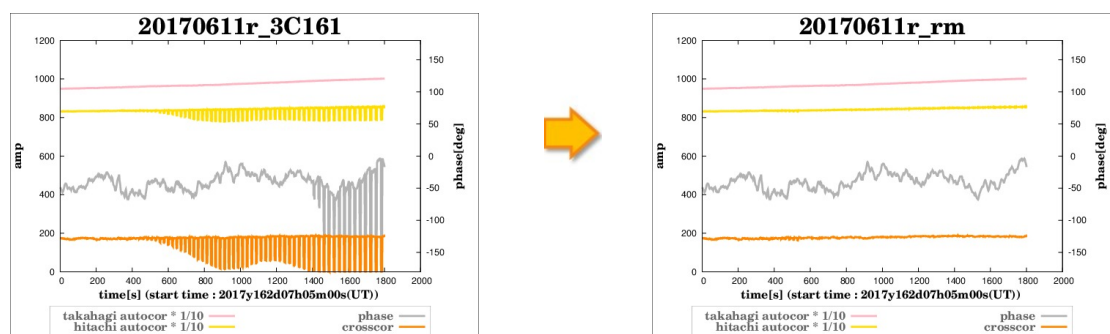


図: A.6 3C161(20170611r) の補正前 (左) と補正後 (右, 図 4.17 と同様)

次に、この異常データの除去方法を述べる。

例えば 20170611r の補正前の、1400 秒以降のように、異常発生時に相互相関強度がほぼ 0 になるの

であれば異常発生データを削除する補正は容易である。しかし 20170612f のように中途半端に相互相関強度の値が小さくなるものも含まれている。よって今回は相互相関強度が直前 200 秒での最大値（観測開始から 200 秒以内のデータは観測開始からの最大値）と比較して 10 パーセント以上小さい値をとるデータを削除した。

ここで、この異常発生時のスペクトル等の状態について示す。

図 3.9 で、1 回の積分毎に出力されるスペクトル例を示した。その読み方である図 3.10 に、これらのスペクトル中の右半分は左半分のミラーであるとして示している。よってここではこの「左半分」に対応するチャンネルの範囲について、20170611r の観測におけるスペクトルを示す。まず、およそ 100 秒付近の、相互相関強度が 0 になっていない（正常と思われる）時刻でのスペクトルが以下である。

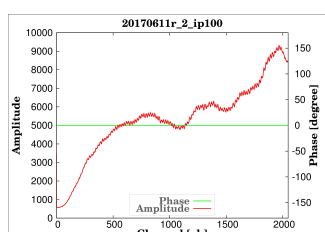


図: A.7 高萩自己相関
(20170611r, 約 100 秒目)

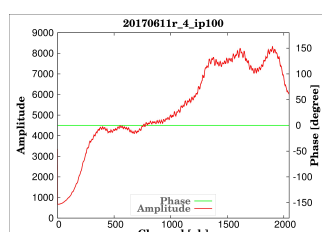


図: A.8 日立自己相関
(20170611r, 約 100 秒目)

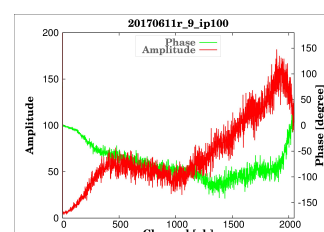


図: A.9 相互相関
(20170611r, 約 100 秒目)

一方、相互相関強度が 0 付近になっているおよそ 1780 秒付近のスペクトルが以下である。

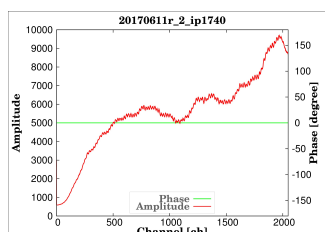


図: A.10 高萩自己相関
(20170611r, 約 1780 秒目)

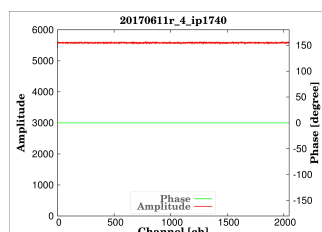


図: A.11 日立自己相関
(20170611r, 約 1780 秒目)

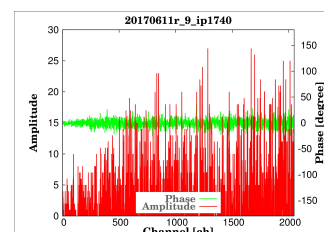


図: A.12 相互相関
(20170611r, 約 1780 秒目)

100 秒目と 1740 秒目で高萩の自己相関スペクトルはほぼ同一であるが、日立の自己相関スペクトルは異なっていることが分かる。一般に、バンドパス特性等から装置を経て出力された結果は周波数に対して一定の値にはなりにくい。本システム中にはバンドパスフィルター等も含まれているため、出力が周波数に対して完全に一定にはなり得ない。だが、1740 秒目における日立の自己相関スペクトルは周波数に対してほぼ一定となっている。これは明らかに異常である。正常と思われる 100 秒目の相互相関強

度は最大で 200 程度になっているのに対し、1740 秒目の相互相関強度の値は最大でも 30 に満たない。高萩と日立の結果に相関があるほど相互相関強度は大きな値となるため、1740 秒目ではほぼ相関のないデータになってしまっているということが分かる。

また、例えば 20170612f の補正前のグラフは、特に 400 秒から 1000 秒付近は相互相関強度のグラフがあたかも塗りつぶされているかのように見える。この 600 秒から 700 秒の部分拡大すると以下のようになる。

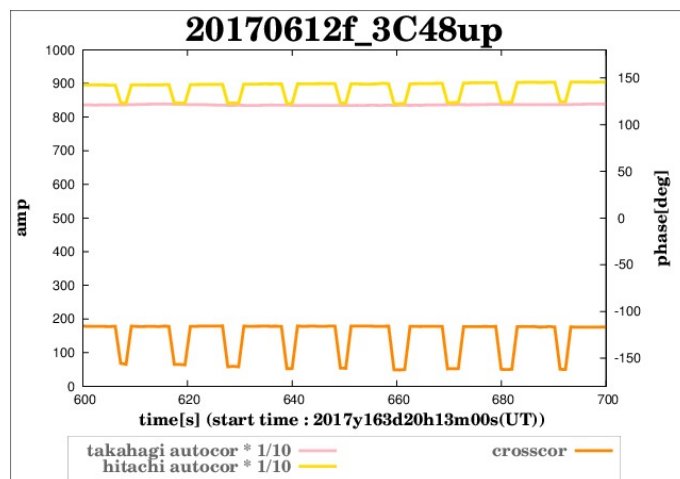


図: A.13 20170612f を時間方向に拡大したグラフ

よって、塗りつぶされている部分は 20170610j の観測で発生している現象と似た状況であるが、相互相関強度が小さくなる時間が比較して短いために塗りつぶされているように見えているだけと考えられる。さらに、20170610j の異常データは相互相関強度がほぼ 0 であったが、20170612f では 0 にはなっていない。そこで、20170612f の 660 秒目のスペクトルを載せる。

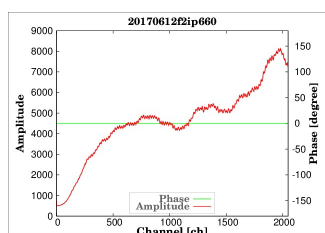


図: A.14 高萩自己相関
(20170612f, 約 660 秒目)

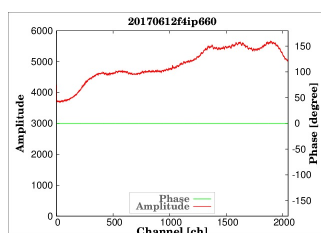


図: A.15 日立自己相関
(20170612f, 約 660 秒目)

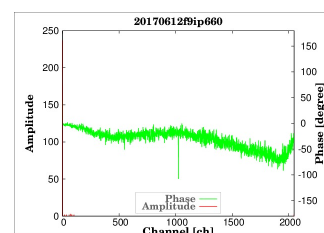


図: A.16 相互相関
(20170612f, 約 660 秒目)

この結果から 20170612f_3C48 の相互相関強度が低い値をとる時は、日立の自己相関スペクトルが完全に平らにはならないが正常と思われる場合のスペクトルよりも平坦になっていることが分かる。

20170612f_3C48 の相互相関スペクトルを見ると広いチャンネルで相互相関強度がプロットされてい

ない。これは結果が負の値になってしまっていたためである。相関を取る際には電圧どうしを掛けあわせるため出力は基本的にパワーの次元となる。よって基本的には正の値をとるはずである。一方で相互相関の場合は、互いに相関がある場合は正の値となるが、もし完全に真逆の相関、所謂負の相関があると負の値となる。例えば $y = x$ のグラフと $y = -x$ の式は負の相関がある。よって、ここではたまたま負の相関となってしまう、プロットされなかったと考えられる。

この1秒毎に出力されるスペクトルは、§3.2.5 より約 250000 点積分の結果である。もしこの 1.024 秒間自己相関スペクトルが異常な状態が続けば相互相関強度は 0 になり、1.024 秒積分のうち部分的に異常が発生すると相互相関強度が他より低い、つまり図の相互相関強度が他より低い部分のようになるとも推測できる。

最後に、異常データ消去前と補正後の結果を比較しておく。まず、補正前と補正後の各観測ごとの強度平均が以下である。補正後の結果に使用したデータ点数も参考のため記載する。もし 30 分すべてのデータを使用できた場合、その点数は 1758 点となる。(30 分観測を積分時間の 1.024 秒で割った値を切り上げると 1758 であるため。)

表: A.2 3C48 相互相関強度平均 (補正後)

観測コード名	補正前	補正後	使用点数
20170611f	176.308084	176.308084	1758
20170612f	164.483732	178.199676	1482
20170612g	157.860399	181.273454	1452
20170612j	180.562601	180.562601	1758

表: A.3 3C123 相互相関強度平均

観測コード名	補正前	補正後	使用点数
20170609c	309.511287	358.761528	1418
20170611e	365.275433	365.275433	1758
20170612k	293.025825	293.025825	1758
20170612l	301.901820	301.901820	1758
20170613a	328.745321	328.745321	1758

表: A.4 3C161 相互相関強度平均

観測コード名	補正前	補正後	使用点数
20170610b	166.399328	166.399328	1758
20170610j	155.945326	176.532584	799
20170611r	153.448979	177.494328	1451

表: A.5 3C286 相互相関強度平均

観測コード名	補正前	補正後	使用点数
20170610m	278.338909	278.834402	1730
20170610r	286.837398	286.837398	1758
20170613f	294.024333	294.024333	1758
20170613g	291.748075	291.748075	1758
20170613i	289.966132	289.966132	1758

これらの結果を天体ごとに平均した値の比較が以下である。

表: A.6 天体ごとの平均 (補正前)

3C48	169.8037
3C123	319.6919
3C161	145.2645
3C286	288.1910

表: A.7 天体ごとの平均 (補正後)

3C48	179.0860
3C123	329.5884
3C161	173.4754
3C286	288.2821

この出力値と実際の強度をプロットしたものが以下である。



図: A.17 出力と実際の強度の比較 (補正前)



図: A.18 出力と実際の強度の比較 (補正後)

横軸を時刻としたそれぞれの観測のグラフで異常データは正常と思われる部分より強度が低くなっていたことから明らかであるが、補正前は全体的に相互相関強度の出力値の平均が小さくなっていたことが分かる。

Appendix D dmxcal による影響

異常が発生してしまった場合、本相関器において dmxcal と名前が付いている「装置のキャリブレーション」を実行する必要がある。2017 年 6 月 7 日から 13 日にかけての観測期間中にはここまで示したように多数の異常が発生してしまっていたため、dmxcal も基本的にはその異常が発生した観測終了後に行っていた。

この確認のために、同一天体の測定を 1 回行い、続けて再度測定を行い、さらに dmxcal してからもう一度行うという方法を考えた。これらは 3C48 が 20170612f, 20170612g, 20170612j, 3C123 が 20170612k, 20170612l, 20170613a, 3C286 が 20170613f, 20170613g, 20170613i の観測に対応する。その測定結果を横軸に時刻、縦軸に相互相関強度として示した結果が以下である。

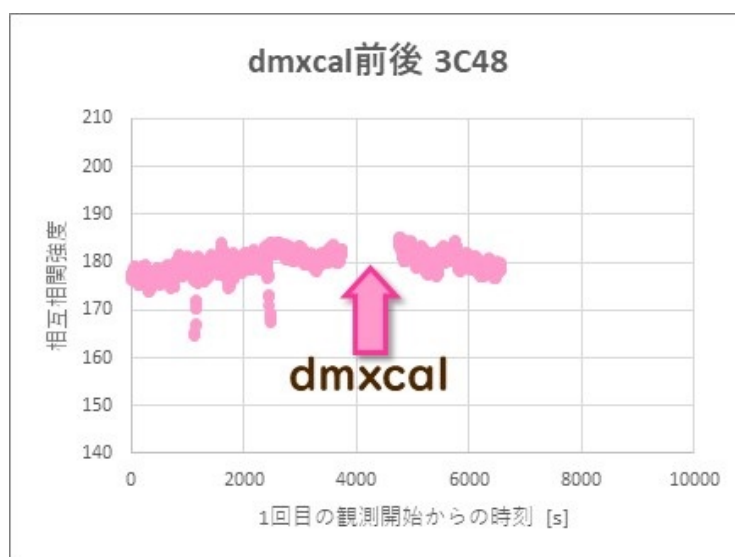


図: A.19 dmxcal 前後の変化 (3C48)

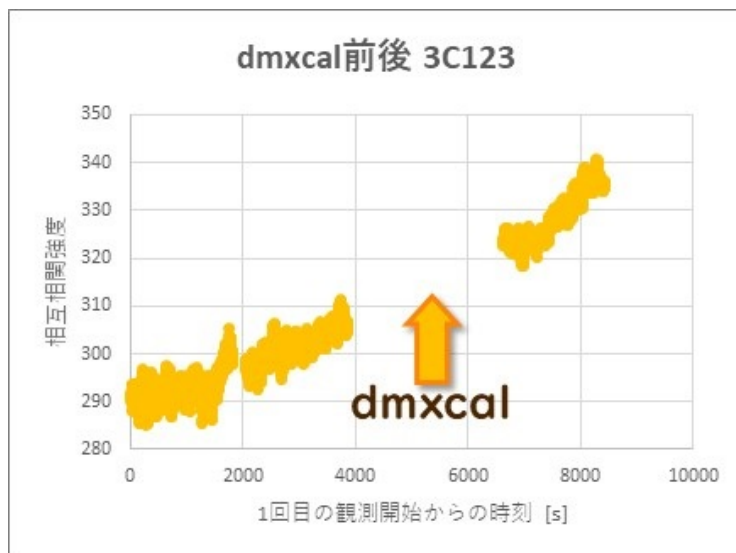


図: A.20 dmxcal 前後の変化 (3C123)

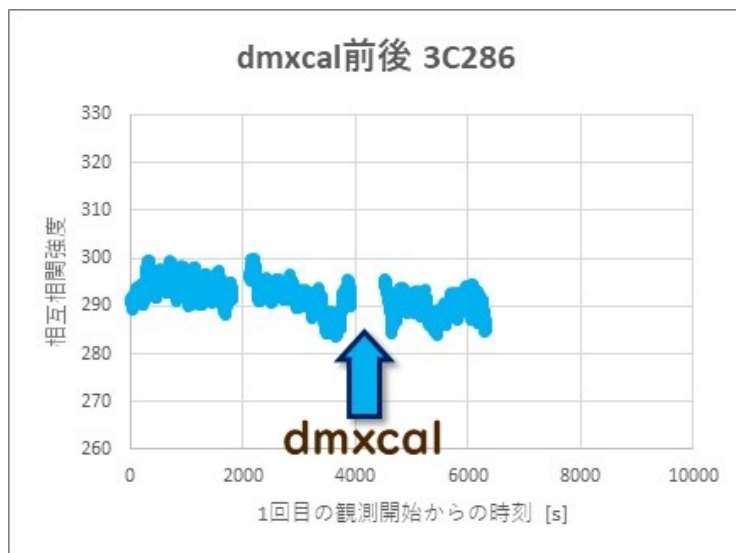


図: A.21 dmxcal 前後の変化 (3C286)

観測した 3 天体のうちの 3C123(図 A.20) では特に時間に対する変動が大きく見える。この原因は偏波等も考えられるが、いずれにせよ 3C123 の結果も含め、dmxcal によって出力値が変化していた可能性は無かったという結果が得られる。

Appendix E 異常の原因調査

異常なデータが発生する、つまり出力がでたらめになってしまうということは、関連器の処理過程においてひとつのデータを表す bit 数ではデータを表しきれなかったという可能性が考えられる。仮に想定よりかなり大きい値をもつデータが混じってしまうと、決められている bit 数で表現できる大きさ以降のデータに影響を及ぼすということが起こり得る。つまり異常なデータが発生していたということは、想定より大きな強度を観測してしまっていた、RFI に影響されていたということかもしれない。実際に、この異常の原因は強い電波のノイズであった。

RFI ではなくサンプラーの時刻の同期がズレていた可能性も否定できないが、本調査では RFI の可能性について議論した。

ここでは、RFI の影響を確かめるために行った 2 つの調査について述べる。まずひとつめが黒体の観測であり、§E.1 に述べる。次に本システム中のサンプラーがノイズを発していたことが判明したため、それに関する内容と調査を §E.2 に述べる。

E.1 黒体観測

前述のとおり RFI の影響を調査すべく黒体を観測した。本節ではその方法と結果を述べる。

方法

ふつう、受信される信号には、天体からの信号の他に大気や装置によるノイズが含まれる。これらは時間的になめらかな強度変動しか示さないので、§4.1 のような異常なデータが発生するとは考えにくい。このような異常なデータが発生する原因としては、アンテナから入ってくる強い電波 RFI か、装置起因の何等かの不具合が考えられる。

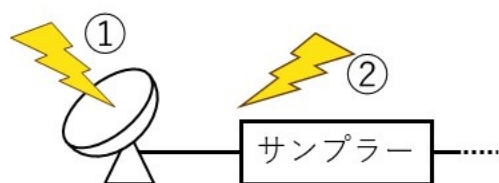


図: A.22 一般的な雑音



図: A.23 黒体挿入時の雑音

黒体を観測することで、図 A.23 のようにアンテナから入ってくる強い電波を取り除くことができる。黒体観測を行っても異常データが発生するのであれば本システムのサンプラー以降に何等かの原因があったということになり、またもし黒体観測によって異常データが発生しなくなれば RFI が混入していたということが分かる。

実際には黒体を入れることで入力信号強度が増加するためアッテネーターを 10 dB 挿入する必要がある。このアッテネーターはサンプラーの直前（受信機の後）に繋がっているため、もしアンテナからサンプラーまでの間に原因があるとそれも減衰されてしまうことに注意が必要である。つまり、厳密には異常データが発生しなくなれば RFI の混入或いはアッテネーター以前の装置の影響ということになる。

黒体を入れた観測等を行った。その観測諸元を表 A.8 に、観測の一覧を表 A.9 に示す。

表: A.8 黒体観測の観測諸元（2017 年 10 月 24 日から 11 月 17 日にかけて）

アンテナ	高萩32m、日立32m	
観測周波数	6 GHz	6600 – 7712 [MHz]
	8 GHz	8192 – 8704 [MHz]
	22 GHz	22023 -22535 [MHz]
帯域幅	512 MHz	
システム温度	6, 8 GHz	～ 30 [K]
	22 GHz	～ 100 [K]
中間周波数	512 – 1024 [MHz]	
サンプラー・ 相関器	エレックス工業製サンプラー、 FX型ハードウェア相関器 OCTAD-C	
サンプルビット数	3 [bit]	
サンプリングレート	1024 [Msamples / s]	
観測期間	2017年10月24日 – 2017年11月17日	

表: A.9 黒体観測一覧（2017 年 10 月 24 日から 11 月 17 日にかけて）

観測コード名	高萩周波数	日立周波数	観測開始時刻 (UT)	観測時間	備考
20171024b	22 GHz帯	8 GHz帯	2017y 297d 09h 05m 00s	4 時間	黒体in
20171024e	22 GHz帯	8 GHz帯	2017y 297d 14h 15m 00s	3 時間	黒体in
20171101a	22 GHz帯	8 GHz帯	2017y 305d 02h 00m 00s	1 時間	黒体in
20171117a	22 GHz帯	6 GHz帯	2017y 320d 23h 40m 00s	1 時間	黒体なし
20171117b	22 GHz帯	6 GHz帯	2017y 321d 01h 20m 00s	1 時間	黒体in
20171117c	22 GHz帯	6 GHz帯	2017y 321d 04h 55m 00s	1 時間	黒体in サンプラー入れ替え

§4.1 の観測で異常が発生していたデータは、自己相関スペクトルが異常になっていたことから発生していた。よって今回は自己相関のみを測定した。（相互相関を測定しても勿論構わないが、そのためには両アンテナとも同じ観測周波数帯の受信機を搭載する必要がある。受信機入れ替えには現状人手と日数が必要であるため、今回は特別必要ではない相互相関は測定しなかった。）

また、備考の欄にサンプラー入れ替えと書いてあるものは高萩局のサンプラーと日立局のサンプラーを入れ替えて行った観測であるが、本節では特に考察しない。

結果

観測結果を、横軸時刻、縦軸自己相関強度のグラフで示す。

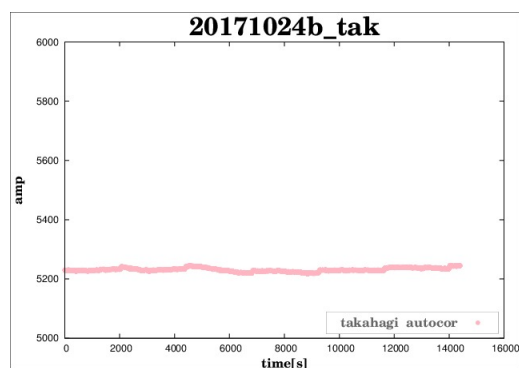


図: A.24 20171024b(高萩)

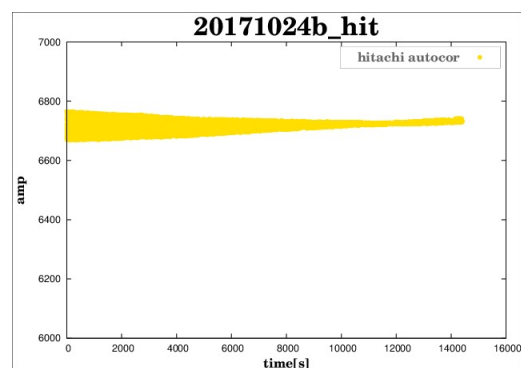


図: A.25 20171024b(日立)

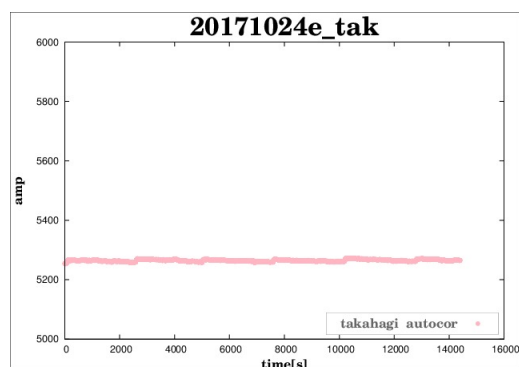


図: A.26 20171024e(高萩)

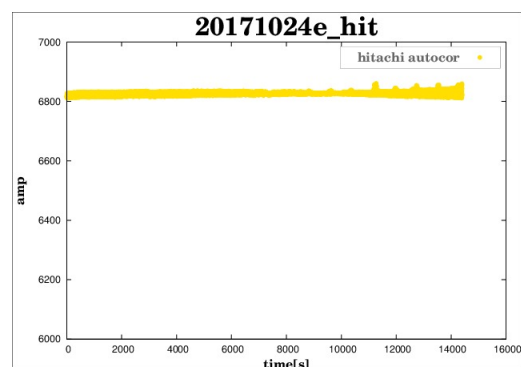


図: A.27 20171024e(日立)

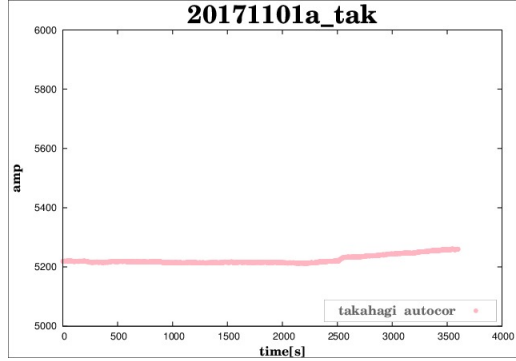


図: A.28 20171101a(高萩)

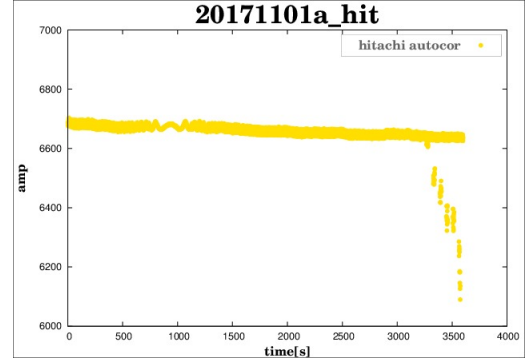


図: A.29 20171101a(日立)

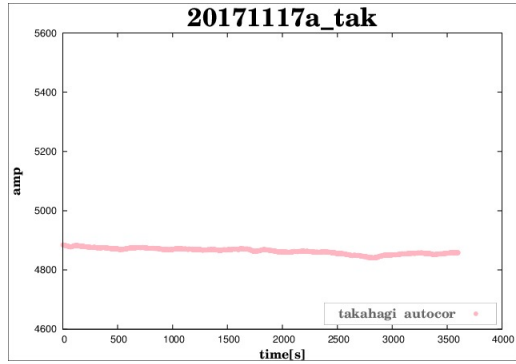


図: A.30 20171117a(高萩)

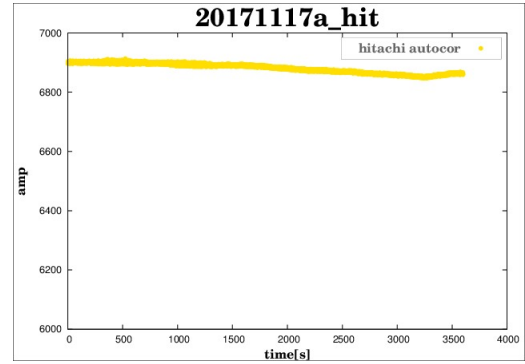


図: A.31 20171117a(日立)

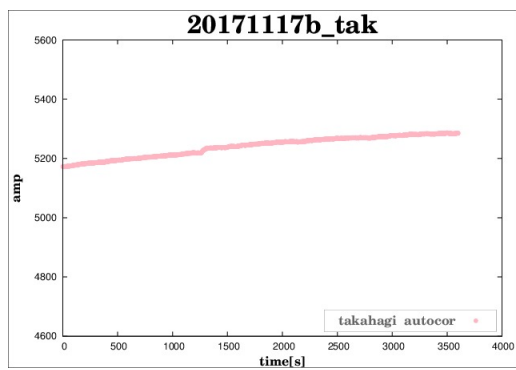


図: A.32 20171117b(高萩)

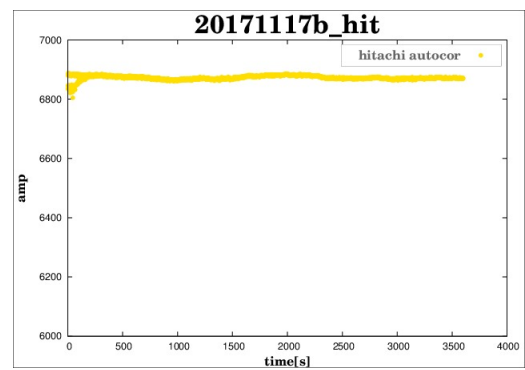


図: A.33 20171117b(日立)

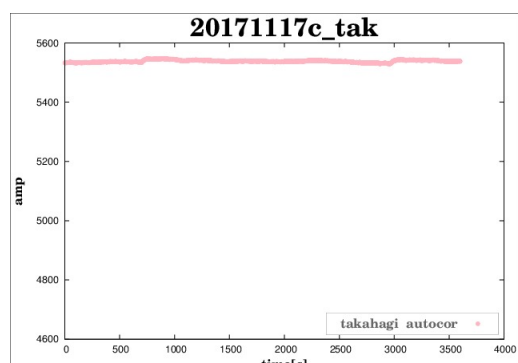


図: A.34 20171117c(高萩)

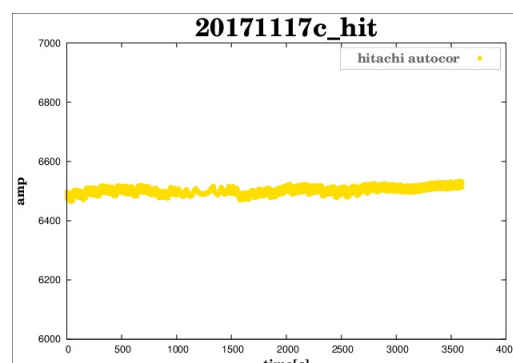


図: A.35 20171117c(日立)

§4.1 で述べた異常が発生していた結果、例えば図 4.3 や図 4.5 等では、日立の自己相関強度が縦軸の 900 から 1000 付近の範囲で変動していた。これらのグラフは見やすくするため出力値を 10 分の 1 にして自己相関強度をプロットしている。このことから異常発生時は、実際の出力値としては 9000 から 10000 の範囲で変動をしていた、つまり 1000 程度小さい値になっていたことが分かる。言い換えると異常発生時の自己相関強度は正常時から 10 パーセント程度低くなっていた。

一方、今回の結果のグラフは、縦軸の最大値と最小値の差を 1000 に揃えている。また、出力値のままでプロットしている。出力値が 5000 から 6000 程度であることから、図 A.29 を除いて全て最大でも 5 パーセント未満の変動であった。

また、前述のとおり異常が発生した後は dmxcals をしなければ正常な観測状態に戻りにくい。§4.1 の観測では基本的に異常が発生した観測が終了するとすぐに dmxcals を行っていた。その時の観測時間は 30 分であったことを考えると、その短い時間で異常が発生していたことが分かる。一方で今回の観測は 1 つあたり 1 時間以上観測をし続けているにも関わらず、異常がほぼ発生しなかった。

考察 1 では、図 A.29 の結果について考察する。また、今回の観測において高萩の自己相関強度、日立の自己相関強度それぞれに固有の変動がみられた。それを考察 2 で考える。

考察 1 図 A.29 について

図 A.29 では、観測開始から 3500 秒程度の時刻で自己相関強度が 10 パーセント程度低くなっている部分がある。この時の自己相関スペクトルと、開始直後約 5 秒目の時の自己相関スペクトルが以下で

ある。

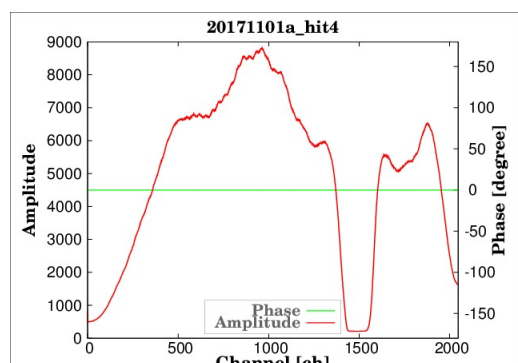


図: A.36 20171101a 日立 約 5 秒目

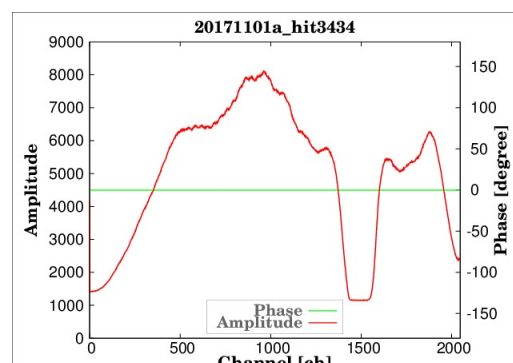


図: A.37 20171101a 日立 約 3500 秒目

図 A.37 を見ると、図 A.36 に比べてスペクトルが少し平らに近づいていることが分かる。よって、これらのスペクトルから、図 A.29 の 3500 秒目付近で自己相関強度の値が小さくなっていたのは、§4.1 の異常と同じ、或いはその状態に近づきかけていたと考えることもできる。だが、この観測でしかこの状況は見られていない。§4.1 の異常発生頻度と比較すると非常に低いことが分かる。

考察 2 各局固有の変動について

黒体観測において、高萩自己相関強度、日立自己相関強度それぞれに固有の変動がみられたため、その原因が相関器の処理過程におけるものではないか確認した。実際の観測では相互相関の結果を用いるため各局固有の変動は相関されず影響はない。本研究の本筋からは離れるため、この内容は簡単に触れておく。

高萩の自己相関強度は、ある程度どの観測においても一定であるが、たまに値が連続的でなくなっている部分がある。例えば 20171024e では 2500 秒のところから約 2500 秒ごとに、20171117b では 1200 秒付近に見られる。これが相関器起因の現象かどうかを確認するためにパワーメーターの値と比較した。

パワーメーターは、周波数変換された後に図 A.38 のように本相関器に繋がるサンプラーと 2 分配されて繋がられている。

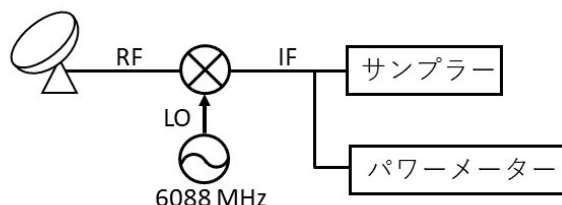


図: A.38 パワーメーターの位置

このパワーメーターの値と、高萩の自己相関強度とを比べた図が図 A.39 である。パワーメーターに記録されていた 20171101a の観測時の結果を示す。

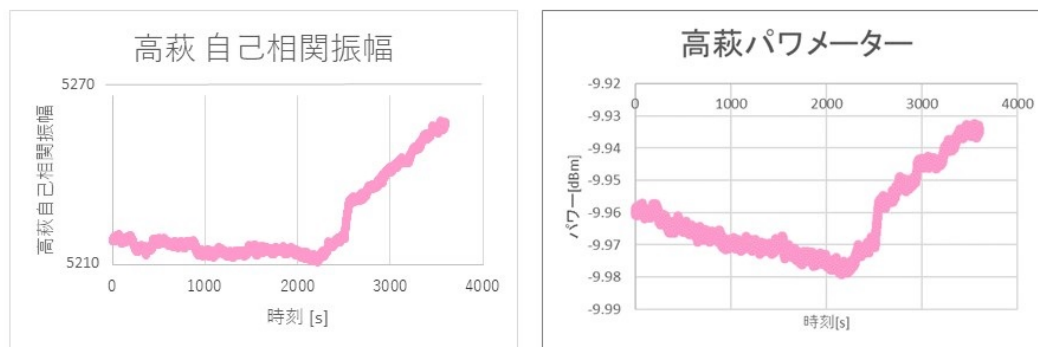


図: A.39 高萩自己相関強度とパワーメーター

この結果から、高萩固有の自己相関強度の変動は相関器の影響ではなく、それ以前の段階から起こっていることが分かった。パワーメーターでも記録されていて一定時間間隔で起こることから、観測室等に設置されているエアコンが原因であると推定できる。

次に、日立の自己相関強度について述べる。日立の自己相関強度は、高萩に比べて値の分散が大きく見える。これを拡大すると図 A.40 の左図のように振動していることが分かった。その右図より、この振動はパワーメーターに記録されていないと考えられる。

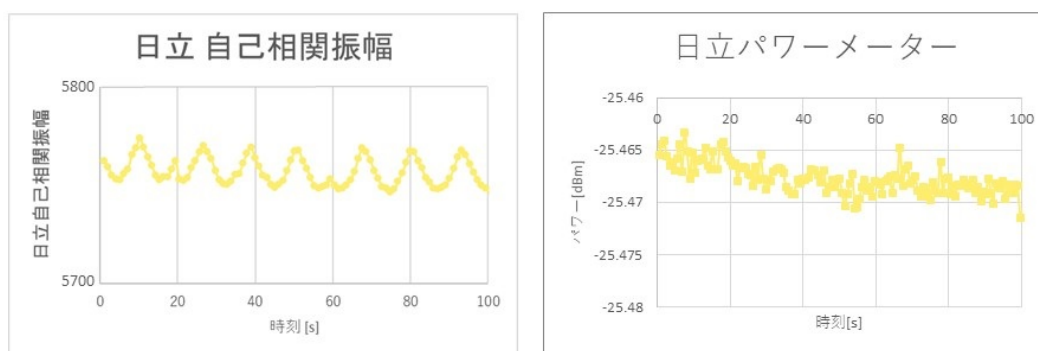


図: A.40 日立自己相関強度とパワーメーター

よって、相関器によって振動が発生しているのではないかと考えられる。本相関器では日立に遅延補

正を行っているが、天体を追尾していない今回の観測でもその補正を行っていた。これがこの振動の原因かもしれない。

結論

黒体の観測では殆ど異常が発生しなかった。よって、RFI によって §4.1 の異常が発生していた可能性が高い。

さらに、今回の測定のうち図 A.30、図 A.31 は黒体を入れていない観測である。もし RFI によって異常が発生していたのであれば、この観測では異常が発生する可能性が高かったはずである。観測数が少ないため何とも言えないが、この観測で異常が発生しなかった理由は次の §E.2 に述べる内容に関連があるかもしれない。

E.2 サンプラーへの対策と異常発生頻度

本相関器を用いた測定を、2016 年 4 月以降、主に表 A.10 の期間で行ってきた。この表 A.10 中の期間 D から E の間に、本相関器の電源を入れたままにしておく日立局で毎日行っているメタノールメーザーのモニター観測に影響をおよぼすことが分かった。具体的には、本システム中のサンプラーがいくつかの周波数において強い電波を発し、丁度モニター観測の観測周波数内であった。この対策のために、以下の図 A.41 を本サンプラーと相関器を製造したエレックス工業が同期間中に行った。

表: A.10 2016 年度から 2017 年 11 月までの主な観測期間

観測 期間名	観測日	周波数帯 [GHz]	
		高萩	日立
A	2016.11.24 – 2016.11.25	6, 8	6, 8
B	2017.01.16 – 2017.01.25	6, 8	6, 8
C	2017.04.30 – 2017.05.15	22	22
D	2017.06.06 – 2017.06.13	8	8
E	2017.10.24 – 2017.11.17	22	6, 8



図: A.41 サンプラーに施した対策

ちなみに、日立に設置しているサンプラーにより多くの対策を行った理由は日立局で毎日行っているメタノールメーザーのモニター観測への影響を可能な限り早く解決したかったためである。本サンプラーは巻取室に設置しており、本相関器は観測室に設置している。これらの場所の位置関係が図 A.42 であ

り、各局はアンテナ、巻取室、観測室から成る。前述の通り高萩局と日立局の間は約 260 m である。

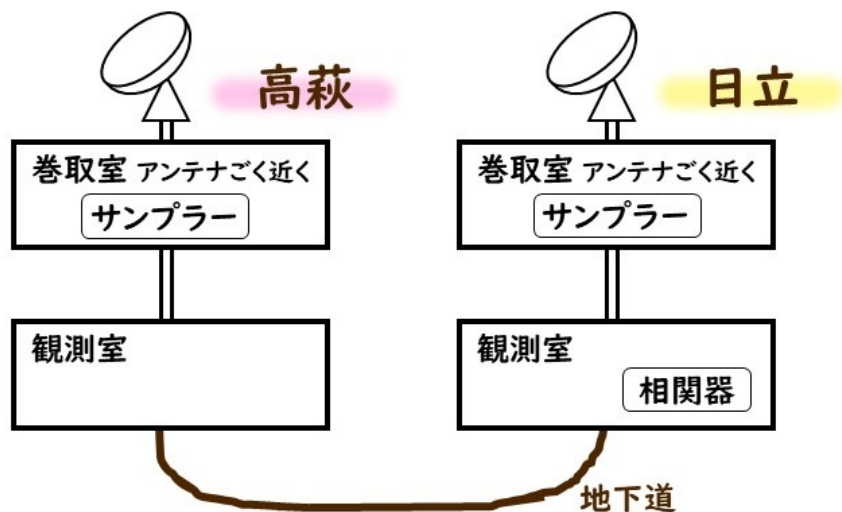


図: A.42 局内の位置関係

本章ではまずサンプラー対策を実施する前の表 A.10 中における期間 A から D での異常発生頻度を示し、その後に前述の対策による異常発生頻度の変化を調査した結果を述べる。

以前の異常発生頻度

まず、表 A.10 中の期間 A から D における異常が発生した観測と発生しなかった観測の数を各観測周波数帯ごとにヒストグラムにしたのが図 A.43 である。

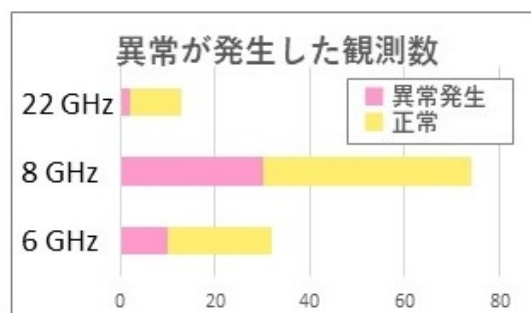


図: A.43 観測周波数別の異常発生頻度

ここから、観測数自体も少ないものの、22 GHz 帯の観測においてはあまり異常が発生していないこと

が分かる。

次に、表 A.10 の期間 A、B、D において異常が発生した観測のうち、異常は高萩と日立どちらで発生していたかを図 A.44 に示す。

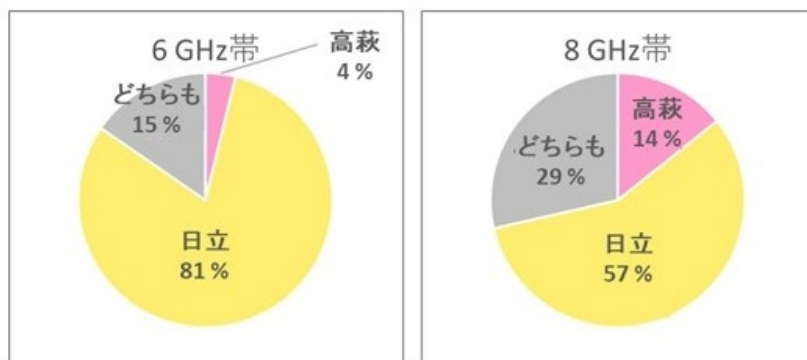


図: A.44 局別の異常発生頻度

図 A.44 の円グラフから、日立局での異常発生が多いことが分かる。

最後に、表 A.10 中の期間 C、D において、前述のとおり異常が発生した場合に必要な装置のキャリブレーション dmxcal を行ってからどのくらいの時間異常が発生しなかったかを図 A.45 に示す。



図: A.45 異常発生が無かった時間

斜線部は異常発生より前に dmxcal を行ったもの

図 A.45 より、8 GHz 帯の観測よりも 22 GHz 帯の観測の方が dmxcal 後長い時間正常に観測できることが分かる。斜線部かつ矢印で示している部分は異常発生より前に dmxcal を行ったため、記載の時間以上に正常な観測を続けられていた可能性の高いデータである。

以上から、今までのところ 22 GHz 帯よりも 6、8 GHz 帯で、高萩局よりも日立局で異常が発生しやすいことが分かる。

方法

図 A.41 のような対策による異常発生頻度の変化を調べるため、これらの対策を敢えて外した観測等を行った。その観測諸元が表 A.11 であり、観測一覧が表 A.12 である。

表: A.11 サンプラー対策に対する観測諸元 (2017 年 12 月 1 日から 18 日にかけて)

アンテナ	高萩32m、日立32m	
観測周波数	6 GHz	6600–7712 [MHz]
帯域幅	512 MHz	
システム温度	6 GHz	～ 30 [K]
中間周波数	512–1024 [MHz]	
サンプラー・ 相関器	エレックス工業製サンプラー、 FX型ハードウェア相関器 OCTAD-C	
サンプルビット数	3 [bit]	
サンプリングレート	1024 [Msamples / s]	
観測期間	2017年12月1日–2017年12月18日	
観測天体	3C286, 4C39.25	

表: A.12 サンプラー対策に対する観測一覧 (2017 年 12 月 1 日から 18 日にかけて)
(* は北周り天体のため途中に 50 分程度の追尾遅れを含む。)

観測コード名	観測開始時刻 (UT)	観測時間	観測天体
20171201b	2017y 335d 21h 00m 00s	1 時間	3C286
20171207a	2017y 341d 14h 30m 00s	7.5 時間 *	4C39.25
20171213a	2017y 347d 16h 50m 00s	4.5 時間 *	4C39.25
20171214a	2017y 348d 19h 10m 00s	2 時間	4C39.25
20171216a	2017y 350d 16h 30m 00s	5 時間 *	4C39.25
20171218a	2017y 352d 16h 50m 00s	4.5 時間 *	4C39.25

結果

本観測の結果をまとめたものが以下の表 A.13 である。まず、表 A.13 の説明をする。観測コード名は表と同じもの、実質観測時間は表 A.13 の時間から追尾にかかったおおよその時間を引いた時間を記している。サンプラーのノイズ対策の欄は記号 ○ が図と同様の対策を行ったこと、△ が対策以前と同じ状況ということ、× がノイズをより発生させるように敢えてサンプラーの蓋を開けたことを示している。蓋を開けるとノイズがより発生するだろうと考えられる理由はサンプラーの中にある電子部品がノイズを発していたからである。また、今までの異常発生は高萩局より日立局が多かったこと、日立の方がより多く対策を行っていることから、日立と高萩のサンプラーを入れ替えた観測を行った。サンプラーが原因であればこの入れ替えによって結果に違いが生じるはずである。この場合をサンプラー入替の欄に「入替」と書いて示している。

表: A.13 サンプラー対策に対する観測の結果（2017 年 12 月 1 日から 18 日にかけて）

観測コード名	実質 観測時間	サンプラー		結果		
		ノイズ対策	入替	高萩	日立	異常発生
20171201b	1 時間	○	入替	○	○	—
20171207a	6.5 時間	○	入替	×	○	開始 1.5 時間後
20171213a	3.5 時間	×	入替	○	×	すぐ
20171214a	2 時間	×		○	○	—
20171216a	4 時間	△		○	○	—
20171218a	3.5 時間	△		○	○	—

表 A.13 の右側が結果であり、各局で異常が発生した場合を ×、発生しなかった場合を ○ として示している。一番右の列に異常が発生した場合の異常発生の時刻を記載している。

これらの結果では、サンプラーへのノイズ対策と異常の発生に相関はないように思える。一方で、今までの観測における異常発生の頻度を考えると観測数が明らかに不足していた。

結論とその後

以上から、サンプラー対策に関する今回の観測では観測数の少なさから異常発生の原因を解明できなかったと考えられる。

Appendix F 卒業論文での測定結果

ここでは、2016 年度大島卒業論文での結果を記載する。その論文は大きく分けて 2 つの部分から成るが、そのうちの本論文 §4.1 に対応する解析を記載する。表 A.10 中の A、B の期間に実施した観測によって行った。

強度既知の天体 3C48、3C123、3C161、3C286 についての 30 分観測ををそれぞれ期間 A で各 1 回、B に各 2 回の計 3 回行っている。期間 A の 3C123 の測定のみ 20 分観測である。

いずれも 6、8 GHz 帯の観測をしているが、ここで解析しているのは 8 GHz の結果である。更にこの期間中にも異常データは多数発生していた。また、期間 A での測定は 10.24 秒積分を行っていたため出力点数がそもそも最大 175 点（3C123 は 117 点）である。観測点数、異常データによる除外点数含めて以下に記載する。

さらに、期間 A では開口能率の補正をすべて一定値 0.6 により行った。B の期間では開口能率の補正は行っているが、計算方法が正確ではなかった（2 台のアンテナの相乗平均ではなく、積を用いていたため補正しすぎていた）。

以下、観測日の早い結果から順に結果を記載した表と、本論文内でも提示した横軸が出力、縦軸を実際の強度としたグラフを示す。



表: A.14 2016 年 11 月 24-25 日の観測結果

図: A.46 2016 年 11 月 24-25 日の観測結果（グラフ）

観測天体	文献値	観測値	比例定数	観測点数	除外点数
3C48	3.33	27.09	0.1229	1758	458
3C123	9.29	34.15	0.2720	1758	604
3C161	3.79	20.30	0.1867	1758	156
3C286	5.2	20.30	0.2562	1758	1552

表: A.15 2016 年 1 月 16 日の観測結果



図: A.47 2016 年 1 月 16 日の観測結果 (グラフ)

観測天体	文献値	観測値	比例定数	観測点数	除外点数
3C48	3.33	19.10	0.1743	1758	205
3C123	9.29	37.23	0.2495	1758	88
3C161	3.79	20.92	0.1812	1758	175
3C286	5.2	36.76	0.1415	1758	80

表: A.16 2016 年 1 月 24-25 日の観測結果

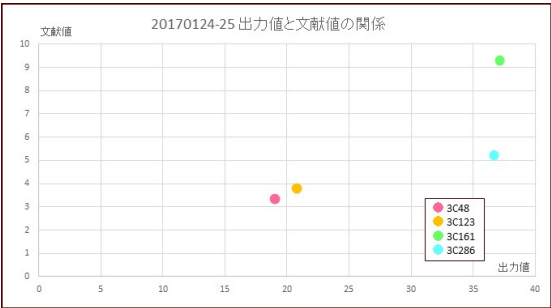


図: A.48 2016 年 1 月 24-25 日の観測結果 (グラフ)

これらのグラフにおける「比例係数」とは、本論文の式 4.1 中における α に対応している。また、グラフにおいて 3C123 と 3C161 の色が反対である。

いずれにせよ、原点を通る一直線とはなっておらず α が一定にならないことが分かる。一方で 1 番最後の観測結果のグラフは本論文 §4.1 中の同様のグラフのプロットの位置と類似しているように思える。(出力値の大きさが本論文での結果と異なるのは、5 章で述べていた設定値が異なるからである。ここで重要なのは横軸の数値よりもプロットの位置関係である。)

もし 2016 年 1 月 24 日から 25 日にかけての結果と本論文の結果がおおよそ正解であれば、ひょっとすると 3C286 の文献値が現在の強度と大きく異なっている可能性もある。