

少数基線広帯域 VLBI 観測システムの立ち上げ

ー高萩-日立二素子干渉計と山口-茨城 VLBIー

茨城大学理学部理学科物理学コース

学籍番号 13S2010S 大島 理穂

概要

電波源には、狭い周波数帯域幅の輝線を放射するものと広い周波数帯域幅の連続波を放射するものがある。茨城大学で運用している高萩市と日立市にある 32m のパラボラアンテナ（以下、それぞれ高萩局、日立局、あわせて茨城局と呼ぶ）では、現在 6.7GHz メタノールメーザーのモニター観測を行っている。メタノールメーザーは輝線であるため、狭い周波数帯域幅での観測で良い。茨城局では 8MHz の帯域幅で観測を行っている。連続波を放射する電波源は狭い周波数帯域幅の観測で事足りるメタノールメーザーなどとは異なり、より広い周波数帯域幅での観測を行うことで感度を向上させることができる。高萩局、日立局それぞれにおいて連続波源を観測するために、より広い周波数帯域幅である 512MHz の観測を行うことができる環境も整っている。

パラボラアンテナを用いる電波観測では、1 台のアンテナを用いる単一鏡の観測だけでなく複数のアンテナを用いた干渉計での観測も行われている。中でも観測に用いるアンテナ間の距離、基線長が短くリアルタイムで相関処理を行えるものを結合型干渉計、基線長が長く観測終了後にデータを送り相関処理する観測は VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 観測と呼ばれる。干渉計で観測するメリットは主に単一鏡に比べて空間分解能が良くなることである。さらに連続波源を観測する場合、単一鏡では大気や装置の影響を消すべく天体を見る ON 点観測と天体を見ない OFF 点観測を素早く行う必要があるが、干渉計を用いると大気や装置の影響は相関しないため OFF 点観測をする必要がなくなる。よって連続波源の電波観測において、干渉計で観測するメリットは大きい。

茨城局では現在、広帯域幅における干渉計での観測環境はまだ整っていない。よって本研究では広帯域における高萩局と日立局による二素子干渉計を立ち上げるべく強度が既知の連続波源を観測し、使用している相関器での出力値と文献値との比較を行った。さらに、パラボラアンテナを茨城大学同様に大学で運用している山口大学のアンテナ（以下山口局と呼ぶ）と茨城局での広帯域における VLBI 観測のシステムの立ち上げを行った。

目次

1	序論	1
1.1	茨城局の現在	1
1.2	帯域幅	1
1.3	干渉計	2
1.4	広帯域幅における干渉計での観測	4
1.5	研究目的	7
2	高萩-日立二素子干渉計	8
2.1	観測	8
2.2	結果	9
2.3	考察	16
2.4	今後の展望	18
3	山口-茨城 VLBI 観測システム	19
3.1	システムの立ち上げ	19
3.2	考察・今後の展望	19
4	まとめ	19
付録 A	山口-茨城 VLBI 観測システム用 PC OCTADISC からの転送方法	21
付録 B	山口-茨城 VLBI 観測システム用 PC 再起動後のマウント処理方法	23

1 序論

茨城大学では口径 32m のパラボラアンテナを電波望遠鏡として 2 台運用している。この望遠鏡では宇宙からの電波を観測している。電波は大気に吸収されにくいことから地上で観測しやすい。そのため、このように大型の装置を用いて観測をすることが可能である。さらに電波は波長が長いことから、複数の望遠鏡で受信した電波を干渉させることも他の電磁波に比べると容易である。この章では、茨城大学が運用している 2 台のアンテナで現在どのような観測を行っているかを述べた後、本研究において重要である観測する周波数帯域幅について、干渉計についてを述べ、最後に本研究で立ち上げようとしている広帯域における干渉計観測についてを述べる。

1.1 茨城局の現在

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り、2 台のアンテナ間の距離はおよそ 260m である。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。茨城局では現在 6.3-7.0, 8.0-8.8, 20.0-25.5 GHz の周波数帯での観測が可能である。主に 6.3-7.0, 8.0-8.8 GHz ではメタノールメーザー、20.0-25.5 GHz では水メーザーの観測を行っている。6.7GHz メタノールメーザーについては日立局を用いてモニター観測を行っている。電波連続波観測は 6.3-7.0, 8.0-8.8, 20.0-25.5 GHz の中から 512 MHz 幅を 3 bit サンプリングして行っている。

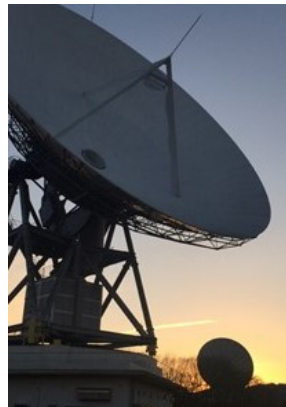


図 1.1: 茨城局のアンテナ
手前が高萩局、奥が日立局

1.2 帯域幅

帯域幅とは何 MHz の周波数幅で観測をしているかのことである。茨城局での 6.7GHz メタノールメーザーの観測は 8MHz の帯域幅で行っている。電波連続波の観測には上述のとおり 512MHz である。メーザーと電波連続波の違いは以下のとおりである。

メーザー

2つのエネルギー準位のうち高い準位の粒子の数が多い状態である反転分布のときに、2準位間のエネルギー差に相当する周波数の電波が入射することで起こる誘導放射のことである。これが連続的に起こることで強い放射となる。おもなメーザーには、OH メーザー、CH₃OH メーザー、H₂O メーザーなどがある。天体の視線方向の動きにより観測される周波数は一定にはならないものの、同じ遷移過程におけるメーザーはあるひとつの周波数になるため、メーザーを観測すると狭い周波数幅となる。

電波連続波

広い周波数幅で観測される電波のことである。電波連続波を放射するものとして、AGN や T タウリ型星などが挙げられる。

望遠鏡の感度を σ とすると、単一鏡の場合、

$$\sigma = \frac{2kT_{sys}}{\eta A \sqrt{\Delta\nu\tau}} \quad (1.1)$$

ここで、
 k = ボルツマン定数 ($= 8.617 \times 10^{-5} \text{ [eV K}^{-1}]$)
 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 [cm^2]
 $\Delta\nu$ = 帯域幅 [Hz]
 τ = 積分時間 [s]

と表されることから、例えば帯域幅を 2 倍にすると感度を $\sqrt{2}$ 倍向上させることができる。

1.3 干渉計

干渉計とは、複数の望遠鏡で受信した電波を相関させるタイプの望遠鏡である。

1.3.1 干渉計の原理

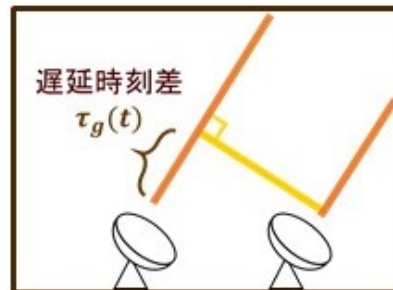


図 1.2: 2 台のアンテナ間の遅延時刻差

干渉計の原理について簡単に述べる。同一天体の電波を離れた場所にある 2 台のアンテナで観測すると、同一時刻に放射された電波は時間差で到達する（図 1.2）。この時間差を遅延時刻差という。天体が見える方位角、仰角は時間とともに変化するため、遅延時刻差も時間変化する。このことから、天体からの放射が $E(t) = E_0 \exp i(2\pi\nu t)$ とすると、それぞれのアンテナでの受信信号はそれぞれ

$$V_1(t) = V_1 \exp i(2\pi\nu t + \phi) \quad (1.2a)$$

$$V_2(t) = V_2 \exp i(2\pi\nu(t - \tau_g) + \phi) \quad (1.2b)$$

と表せる。これを用いると相互相関関数は

$$C_{1,2}(\tau) = \int_{-T/2}^{T/2} V_1(t) V_2^*(t + \tau) dt \quad (1.3)$$

と定義でき、これをフーリエ変換すると

$$\hat{C}_{1,2}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{1,2}(\tau) \exp(-2\pi i \nu \tau) d\tau \quad (1.4)$$

となる。これをクロススペクトルという。干渉計の観測に用いる相関器では、主にこのクロススペクトルの値が出力される。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、これとは逆に電気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スペクトルを導出する相関器を FX 型相関器という。

1.3.2 空間分解能

空間分解能とは、その電波望遠鏡がどれだけ空間的に分解して観測できるかという値である。空間分解能は

$$\Theta = \frac{\lambda}{D} \quad (1.5)$$

ここで、 Θ = 空間分解能 [rad]
 λ = 観測波長 [m]

で表され、分母の D は図 1.3 の通り単一鏡の場合望遠鏡の直径、干渉計の場合アンテナ間の距離である基線長となる。このことから、干渉計で観測すると単一鏡では実現できない良い空間分解能を実現できる。



図 1.3: 空間分解能の違い

1.3.3 干渉計の種類

受信した信号をひとつの相関器へと送りリアルタイムで相関処理するものを結合型干渉計と言う。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、例えば高萩局と日立局の信号は光ケーブルにより1か所に集める仕組みが整っているため二素子干渉計として使用することができる。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。このような仕組みを VLBI 観測システムと呼ぶ。

1.4 広帯域幅における干渉計での観測

電波連続波源を広帯域幅でかつ干渉計で観測するメリットは、以下の3点である。

- 感度を向上させることができる。
- 単一鏡では実現できない空間分解能を実現できる。
- 大気の影響を受けにくくなる。

これらの利点のうち最初の2点の理由は前述のとおりである。

一般的に、電波望遠鏡で電波源を観測すると、その天体の情報に加えて、大気による影響、観測装置による影響が観測値に含まれる。そこから大気と観測装置起因の影響を取り除くため、天体を見ない OFF 点観測を行うことで天体による情報だけを取り出す。OFF 点観測に対し、天体に向ける観測は ON 点観測という。

では、図 1.4 から図 1.9 までの、観測されるスペクトルのイメージ図を用いてその方法を簡単に述べる。まずメタノールメーザーなどの輝線を観測する場合、ON 点を観測すると図 1.4 のようなスペクトル、OFF 点を観測すると図 1.5 のようなスペクトルを得られる。図 1.4 から図 1.5 のデータをひくことによって図 1.6 のように、本来得たい大気と観測装置の影響が入っていないスペクトルを得られる。連続波の場合はスペクトルの形状が異なるものの、輝線の場合と同様に図 1.7 のような ON 点のデータから図 1.8 のような OFF 点のデータをひくことで図 1.9 のように得たいスペクトルを得られる。

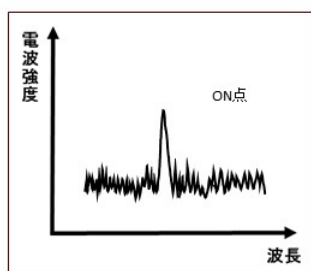


図 1.4: ON 点 (輝線)

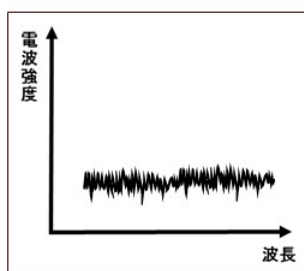


図 1.5: OFF 点 (輝線)

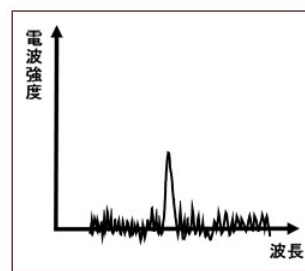


図 1.6: 結果 (輝線)

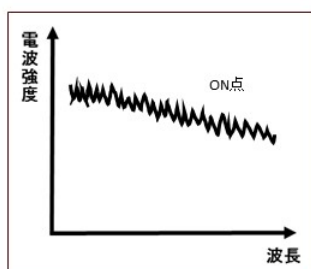


図 1.7: ON 点 (連続波)

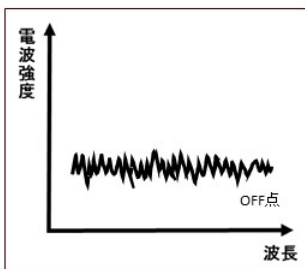


図 1.8: OFF 点 (連続波)

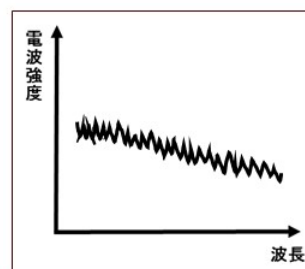


図 1.9: 結果 (連続波)

以上は ON 点観測と OFF 点観測をしている間、大気などが変動しない理想的な場合である。ON 点観測をしてから OFF 点観測をするまでの間に大気などの状態が変化してしまうと、この方法ではうまくいかない。だがレーザーなど輝線の観測の場合 OFF 点観測が図 1.10 のように変動してしまっても、図 1.11 のように天体からの寄与がないであろう周波数範囲の強度を基準としてスペクトルが得られる、つまり base line fitting を行うことができる。よって図 1.12 のように、図 1.6 と同様な結果が得られる。連続波観測の場合はどの周波数においても天体からの寄与が含まれているのでこのような方法をとることはできない。図 1.14 の黒色部が図 1.13 から大気などが変化しなかった場合に観測される OFF 点のスペクトルであるとし、もし大気などの影響で橙色部のような結果になってしまったとすると、図 1.15 の橙色部のような観測結果になってしまう。これらの情報からだけでは、図 1.15 の黒色部である得たい真の連続波強度を得ることができない。

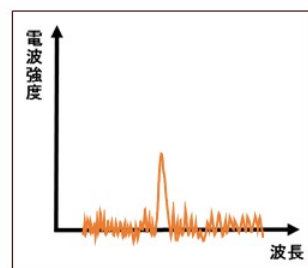
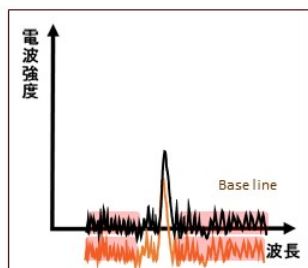
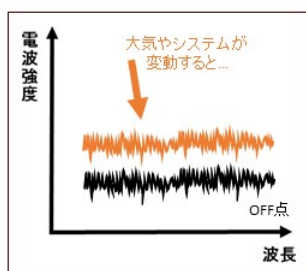


図 1.10: 変動した OFF 点 (輝線) 図 1.11: Base line fitting (輝線) 図 1.12: 求まる結果 (輝線)

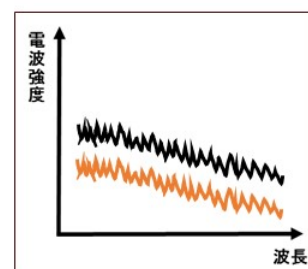
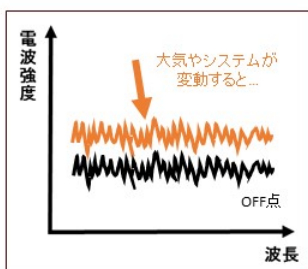
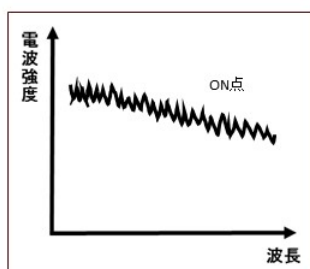


図 1.13: ON 点 (連続波) 図 1.14: OFF 点 (連続波) 図 1.15: 求まる結果 (連続波)

よって、電波連続波の観測を行うには ON 点観測と OFF 点観測の切り替えを大気や受信機システムが変動しない程度に、即座に行わなければならない。どの程度の時間で切り替える必要があるかは、感度の式 1.1 によって決まっている。感度が良くなればなるほど受信機の $1/f$ ゆらぎやシステム変動などにより積分可能時間、つまり ON 点と OFF 点の観測を両方終わらせなければならない時間が短くなってしまふ。さらに図 1.16 のように、感度は広帯域にすればするほど良くなるためより時間は短くなっ

てしまう。

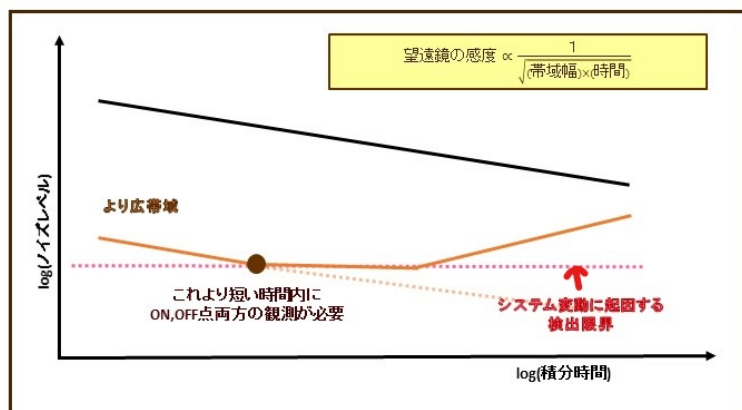


図 1.16: ON 点と OFF 点観測の切り替え時間と帯域幅

このことから、広帯域の観測においては特に ON 点、OFF 点観測の切り替えにかけられる時間が短くなる。

だが、干渉計を用いることでこの問題は解決する。干渉計では、大気や受信機による影響がアンテナによって異なるため相関しない。よって一般に干渉計では OFF 点観測をする必要がない。つまり図 1.17 のようになる。

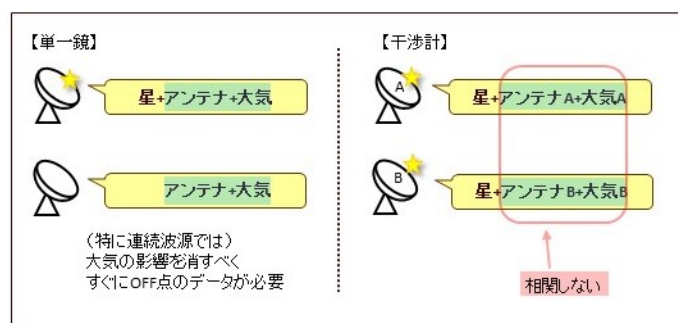


図 1.17: 単一鏡と干渉計の OFF 点観測

以上のことから、広帯域でかつ干渉計で観測を行うことは、電波連続波源の観測において大きなメリットがある。

1.5 研究目的

本研究の最終目的は、高萩-日立での広帯域二素子干渉計観測システムを立ち上げ、連続波源のモニター観測を行うこと、さらに山口-茨城での広帯域 VLBI 観測システムを立ち上げ、連続波源のよりコンパクトな成分のモニター観測を行うことである。そのための第一歩として、この卒論では両システムの立ち上げを行った。

2 高萩-日立二素子干渉計

2.1 観測

茨城局での広帯域における二素子干渉計の相関処理はエレックス社製の FX 型ハードウェア相関器 (図 2.1) を用いて行っている。茨城大学大学院を 2015 年度に卒業された加古琳一氏の修論にて、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。その数天体について、二素子干渉計システムに起因する強度、位相の時間変動を取り除き時間的に安定な測定が可能となっていた。



図 2.1: ハードウェア相関器

本研究では相関器が出力する相互相関係数と実際の強度との関係を調べるために強度が既知である 4 天体についての観測を行った。

図 1.2 のように、干渉計で観測すると 2 つのアンテナ間に遅延時刻差が発生する。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も時間変化する。使用している相関器によって天体座標、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 τ とその微分、二回微分が計算され、相関の際に反映される。

相関器によって 1.024 秒間の強度をベクトル積分し、スペクトルが図 2.2 のよう出力される。このグラフは横軸がチャンネルとなっており 1[ch]、2048[ch] がそれぞれ RHCP (右偏光波) では 8704[MHz]、8192[MHz]、LHCP (左偏光波) では 7112[MHz]、6600[MHz] に相当している。2049[ch] から 4096[ch] は 1[ch] から 2048[ch] を折り返したものであるため意味はない。縦軸は左が赤色のグラフに対応し、振幅を表している。右は緑色のグラフに対応し、位相を表している。この段階で既に遅延時刻差の予測値も計算に含まれているが、それだけでは温度等の影響で高萩と日立を結ぶケーブルの長さが変化することなどから完全には遅延時刻差を補正できない。予測値では補正しきれなかった遅延時刻差の残りである遅延残差がゼロとなるように観測開始後、手でパラメータ入力して観測帯域幅 512[MHz] 内の相互相関位相の傾きをなくすよう調整する (図 2.3)。図 2.3 のようなスペクトルを周波数で積分した値を出力値とし、遅延残差調整中のデータを除き観測時間で平均した値を用いて解析した。

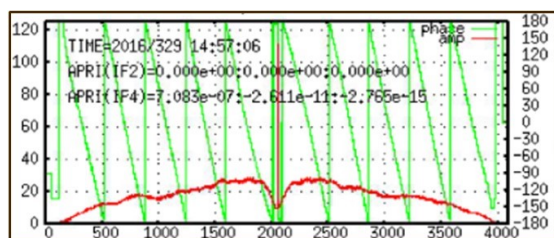


図 2.2: はじめに出力されるクロススペクトル

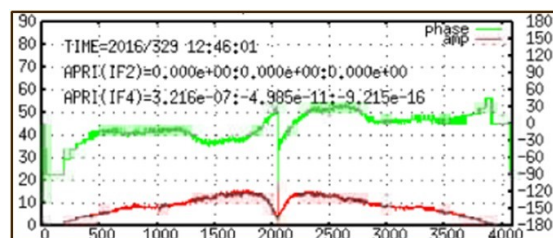


図 2.3: 位相調整後に出力されるクロススペクトル

観測諸元は表 2.4 の通りである。

使用アンテナ	日立アンテナ・高萩アンテナ
観測周波数	RHCP 8192 - 8704 [MHz] LHCP 6600 - 7112 [MHz]
システム雑音温度	～ 30 [K]
IF 周波数	512 - 1024 [MHz]
サンプラー・相関器	エレックス社製 FX型ハードウェア相関器
サンプルビット数	3 [bit]
サンプリングレート	1024 [M回/s]
帯域幅	512 [MHz]
観測天体	3C48, 3C123, 3C161, 3C286
観測時間	30 分

表 1 観測諸元

2.2 結果

2016 年 11 月 24-25 日、2017 年 1 月 16 日、24-25 日の 3 回観測を行った。以下、順番に結果をまとめる。

2.2.1 2016 年 11 月 24-25 日の観測

2016 年 11 月 24 日 12 時 40 分から 20 分間 3C123、13 時 30 分から 30 分間 3C161、16 時 20 分から 30 分間 3C48、24 日 1 時 30 分から 30 分間 3C286 を観測した結果が以下である。この時刻は UT である。それぞれについて 2 つのグラフがあり、左側がその観測での両局の自己相関強度、相互相関強度、位相をまとめて表示したものである。右側は相互相関強度のみを表示したものである。1.024 秒積分ごとに 1 点ずつプロットしており、横軸はいくつめの積分点であるかに対応している。横軸について、時刻がどの程度のスケール幅に対応しているかをグラフ上に矢印で示した。以下の結果はすべて RHCP (右円偏光) の観測結果を使用している。

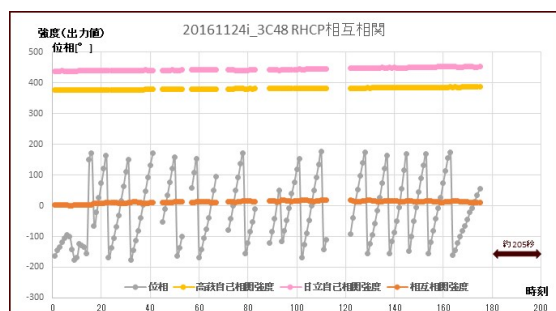


図 2.5: 3C48(2016 年 11 月 24 日)

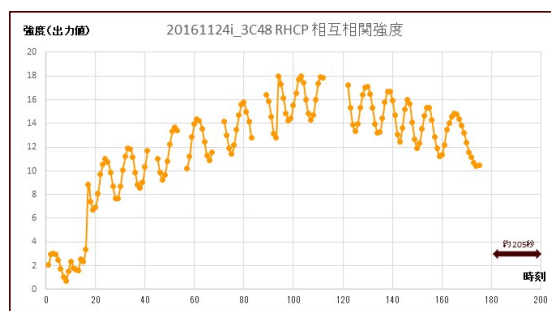


図 2.6: 3C48 相互相関強度 (2016 年 11 月 24 日)

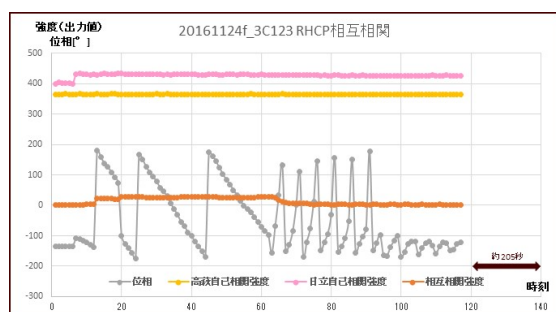


図 2.7: 3C123(2016 年 11 月 24 日)

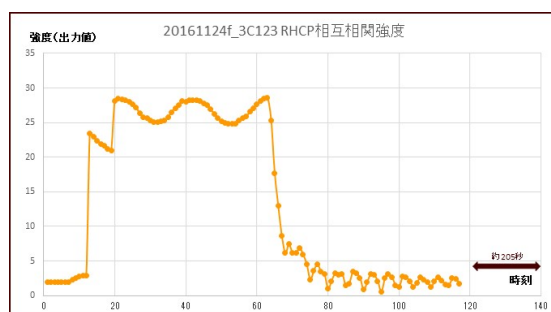


図 2.8: 3C123 相互相関強度 (2016 年 11 月 24 日)

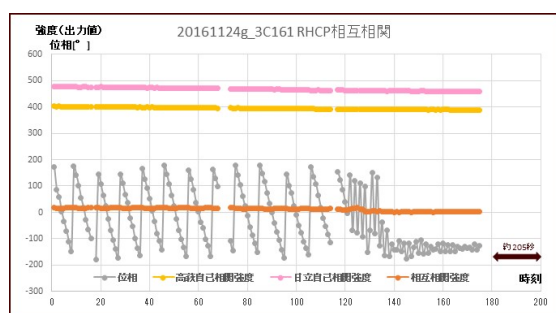


図 2.9: 3C161(2016 年 11 月 24 日)

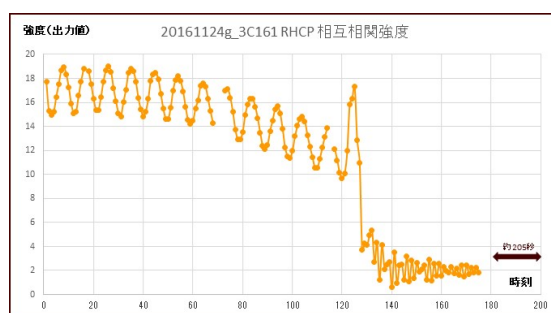


図 2.10: 3C161 相互相関強度 (2016 年 11 月 24 日)

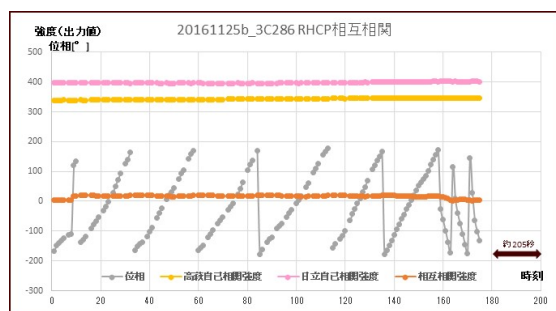


図 2.11: 3C286(2016 年 11 月 25 日)

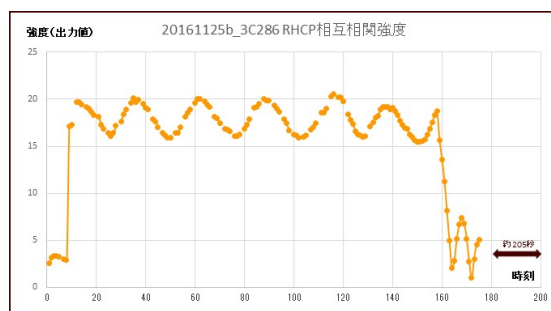


図 2.12: 3C286 相互相関強度 (2016 年 11 月 25 日)

以上の相互相関強度の出力値を平均したものが表 2 の出力値であり、横軸出力値、縦軸文献値でプロットしたものが図 2.14 である。

観測天体	文献値 [Jy]	観測値	比例定数	観測点数 [点]	除外点数 [点]
3C48	3.33	13.18	0.2527	175	65
3C123	9.29	26.69	0.3480	117	22
3C161	3.79	15.37	0.2467	175	57
3C286	5.2	17.88	0.2908	175	87

表 2 2016 年 11 月 24-25 日の観測結果

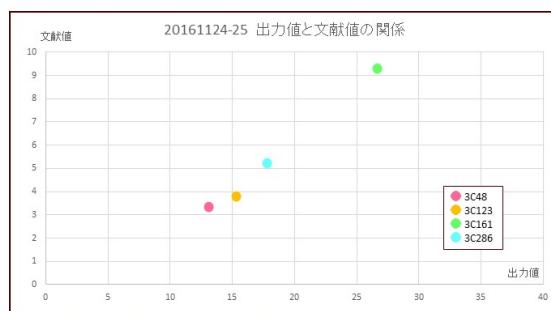


図 2.14: 2016 年 11 月 24-25 日の観測結果 (グラフ)

表 2 における観測点数は 1.024 秒積分をこの観測中に何回行ったかという値である。除外点数は、観測点数から平均時に除外した点数である。除外した点は以下のような点である。

(1) 明らかに自己相関強度の強度が落ちている点

上に示したそれぞれの観測ごとのグラフ (図 2.5 から図 2.12) は既にこの点を除外したものである。除外する前は図 2.15 のような状態である。どちらかの自己相関強度が明らかに下がっている場合を除外した。

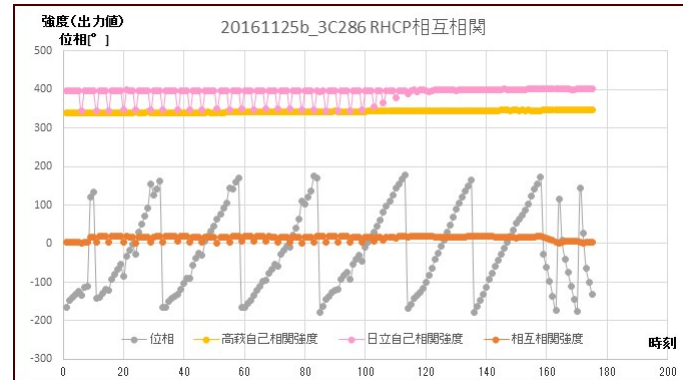


図 2.15: 点を除外する前のグラフ

(2) 遅延残差調整中の点

観測を開始してから遅延残差を調整しているため、遅延残差を調整している間のデータも結果に含まれてしまう。その点を除外した。

この観測において求めたいのは出力値と文献値との関係である。つまり、

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

の α の値を求めたい。どの観測においても α が一定となれば、図 2.14 の各点は原点を通る直線上に並ぶはずである。だが、明らかに一直線にはならなかった。

この観測での 1 番の問題点は明らかに観測点数が少ないことであった。観測点数は 30 分観測した場合、1.024 秒に 1 度データが出力されていれば 1750 点程度になるはずだ。だがその 10 分の 1 程度の観測点数にしかならなかった。この原因として、相関器の設定を間違えてしまっていたことが分かった。(この観測では 1.024 秒積分を 10.24 秒ごとに行い、出力していたようである。)

2.2.2 2016 年 1 月 16 日の観測

相関器の設定をしなおし、2017 年 1 月 16 日 2 時 30 分から 3C286、6 時 25 分から 3C48、7 時 40 分から 3C123、8 時 50 分から 3C161 を観測した結果が以下である。時刻は UT であり、今回の観測はすべて 30 分間である。



図 2.16: 3C48(2017 年 1 月 16 日)

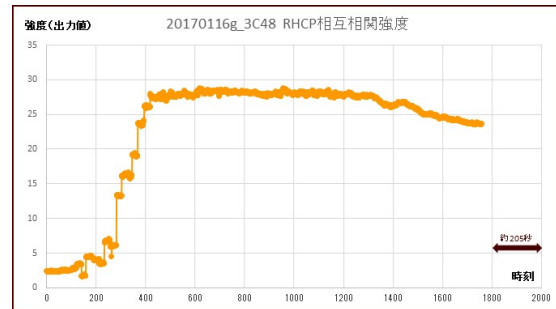


図 2.17: 3C48 相互相関強度 (2017 年 1 月 16 日)

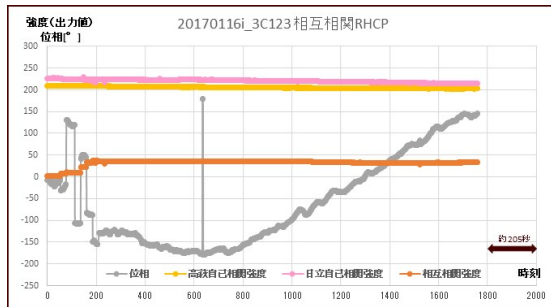


図 2.18: 3C123(2017 年 1 月 16 日)



図 2.19: 3C123 相互相関強度 (2017 年 1 月 16 日)

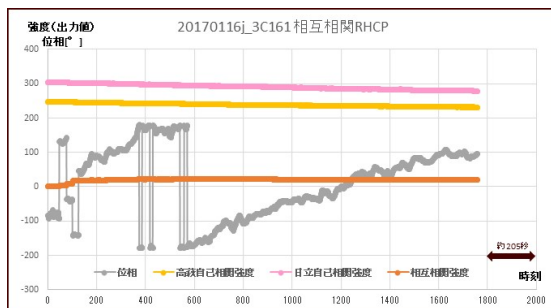


図 2.20: 3C161(2017 年 1 月 16 日)

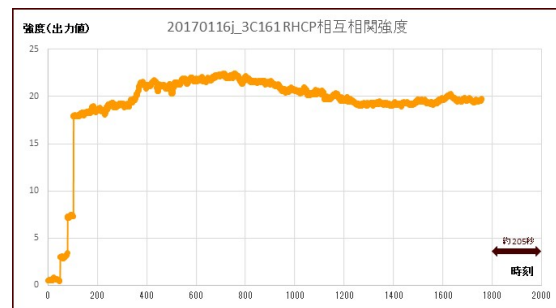


図 2.21: 3C161 相互相関強度 (2017 年 1 月 16 日)

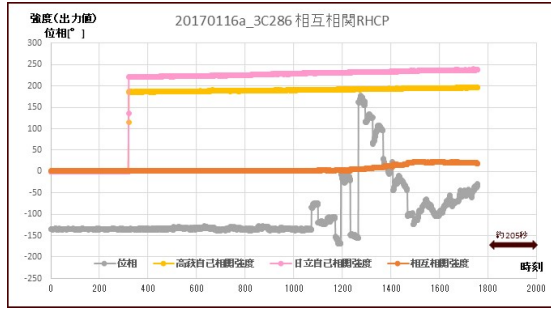


図 2.22: 3C286(2016 年 1 月 16 日)

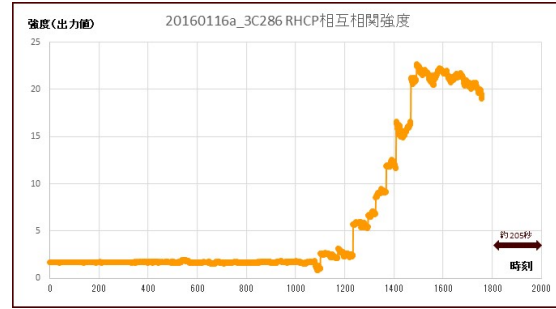


図 2.23: 3C286 相互相関強度 (2017 年 1 月 16 日)

以上の結果から 2016 年 11 月 24-25 日の観測と同様に表 3、図 2.25 をまとめた。

観測天体	文献値 [μJ]	観測値	比例定数	観測点数 [点]	除外点数 [点]
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 3 2016 年 1 月 16 日の観測結果



図 2.25: 2016 年 1 月 16 日の観測結果 (グラフ)

前回の観測ではアンテナの開口能率 $\eta = 0.6$ として処理していたが、今回の観測からは式 2.1a、2.1b の値を用いた。開口能率はアンテナのエレベーションの値に依存する。この式 2.1a、2.1b の値は Yonekura et al.(2006) に記されており、強度一定の天体を長時間追尾して導出したものである。

$$\text{高萩 RHCP} \quad \eta_T(El) = 4.53 \times 10^{-7} El^3 - 8.13 \times 10^{-5} El^2 + 3.98 \times 10^{-3} El + 0.535 \quad (2.1a)$$

$$\text{日立 RHCP} \quad \eta_H(El) = 1.06 \times 10^{-6} El^3 - 1.72 \times 10^{-4} El^2 + 4.99 \times 10^{-3} El + 0.670 \quad (2.1b)$$

今回も、図 2.25 の点は明らかに一直線上にはならなかった。前回の観測で急に強度が下がるものがあったため、その対策として誤って入植信号レベルの調整を行っていた影響が大きい。

2.2.3 2016 年 1 月 25 日の観測

途中で入力信号レベルを調整せず、2017 年 1 月 24 日 21 時 30 分から 3C286、25 日 4 時 10 分から 3C48、7 時 20 分から 3C123、11 時 15 分から 3C161 を観測した結果が以下である。時刻は UT であり、今回の観測はすべて 30 分間である。

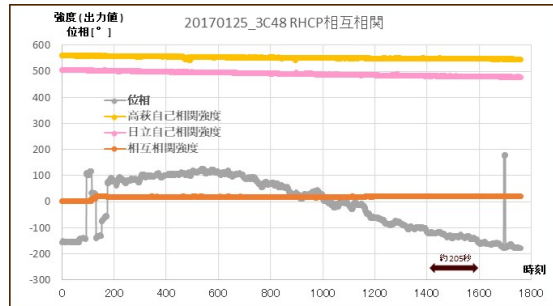


図 2.26: 3C48(2017 年 1 月 25 日)

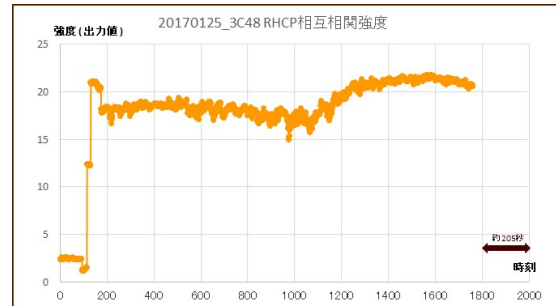


図 2.27: 3C48 相互相関強度 (2017 年 1 月 25 日)

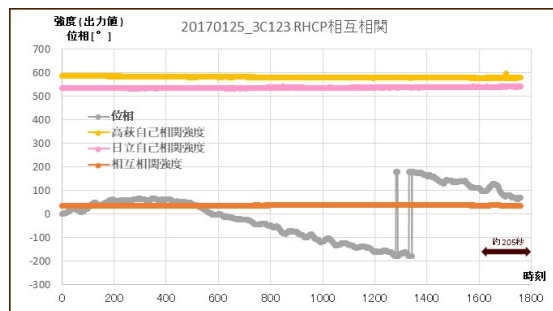


図 2.28: 3C123(2017 年 1 月 25 日)

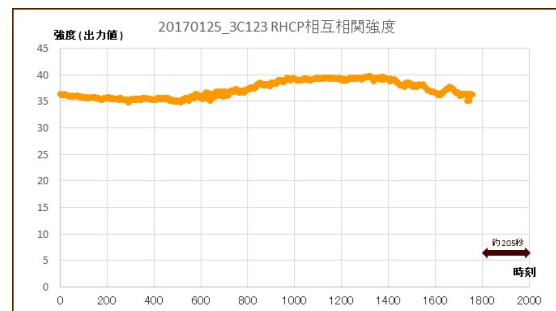


図 2.29: 3C123 相互相関強度 (2017 年 1 月 25 日)

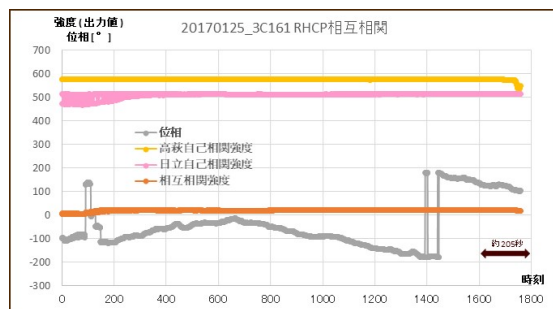


図 2.30: 3C161(2017 年 1 月 25 日)

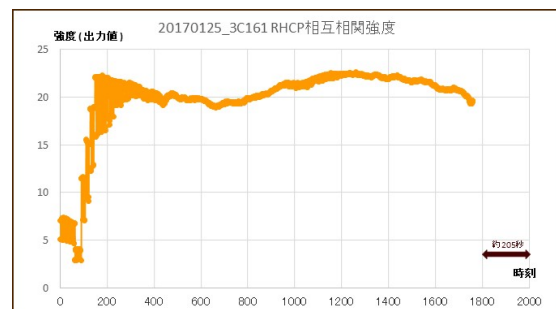


図 2.31: 3C161 相互相関強度 (2017 年 1 月 25 日)

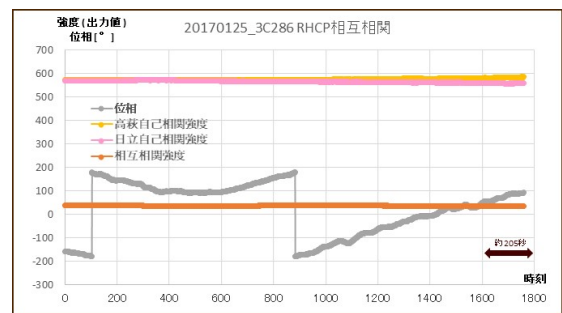


図 2.32: 3C286(2016 年 1 月 25 日)

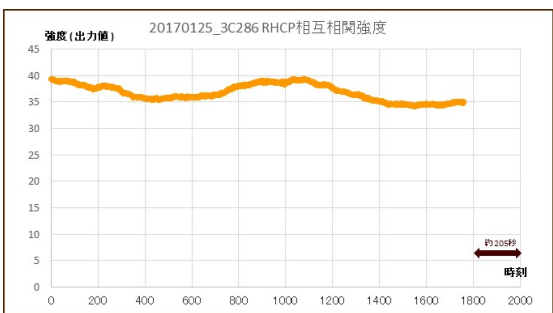


図 2.33: 3C286 相互相関強度 (2017 年 1 月 25 日)

以上の結果から他の観測と同様に表 4、図 2.35 をまとめた。

観測天体	文献値 [μ]	観測値	比例定数	観測点数 [点]	除外点数 [点]
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 4 2016 年 1 月 24-25 日の観測結果

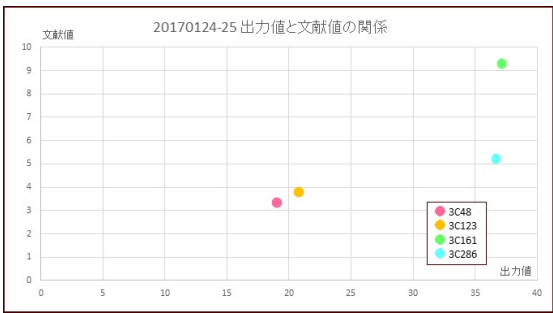


図 2.35: 2016 年 1 月 24-25 日の観測結果 (グラフ)

2.3 考察

今回の結果を誤差も含めてまとめると表 5 のようになる。

観測天体	フラックス密度 [Jy]	相互相関強度 出力値		変換係数	
3C48	3.33	19.10	+ 2.68	0.17	+ 0.05
			− 4.11		− 0.02
3C123	9.29	37.23	+ 2.67	0.25	+ 0.02
			− 2.48		− 0.02
3C161	3.79	20.92	+ 1.69	0.18	+ 0.05
			− 4.56		− 0.01
3C286	5.2	36.76	+ 2.67	0.14	+ 0.01
			− 2.58		− 0.01

表 5 2016 年 1 月 24-25 日の観測結果-2

このことから、変換係数 α は誤差を考慮しても一致しないと判断した。その原因として、

- 位相や強度が時間とともに変化する
- 相関器の設定を間違えている（積分時間の設定等、手で入力するもの）
- 頻繁に装置のキャリブレーションが必要である

ことが考えられる。

さらに、今回の観測では Ott et al.(1994) による値を使用した。この論文は現在より 20 年以上前のものであるため現在の天体強度とは異なる可能性が大いにある。VLA を用いた観測データの中で、今回観測した 3C48 と 3C286 について 2012 年 1 月に観測されたものが公開されている。今回の観測周波数に近い 8435MHz の結果を用いて 2017 年 1 月 24-25 日の結果を用いて同様に計算したものが表 6 である。

観測天体	文献値 [Jy] (VLA)	観測値	比例定数
3C48	3.14	19.10	0.1644
3C286	5.09	36.76	0.1385

表 6 VLA のデータを用いた結果

観測天体	文献値 [Jy]	観測値	比例定数
3C48	3.33	19.10	0.1743
3C286	5.2	36.76	0.1415

表 7 2017 年 1 月 24-25 日の観測を用いた結果

この結果をグラフにしたものが図 2.39 である。

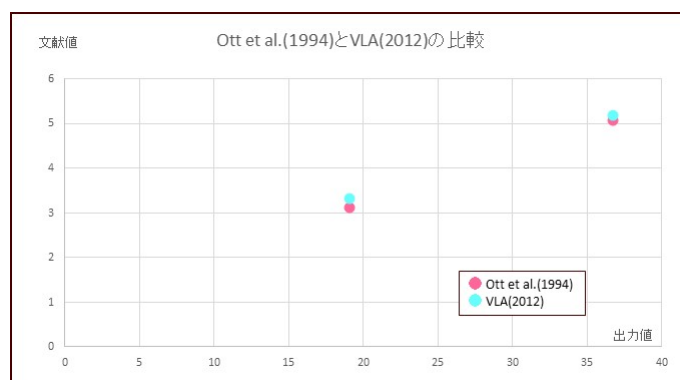


図 2.39: VLA との比較

計算した α (変換係数) の値を見比べると、確かに VLA の結果を用いた方が差は小さくなっているが、大幅には変わらない。そもそも 2 天体についてのみであり、各天体についての観測数も 1 回のみであることから、ここから判断することはできないと考えた。

2.4 今後の展望

まずは今回、変換係数が一致しなかった原因として考えられるもののひとつである観測した強度や位相が時間で変化する原因の特定を行いたい。強度が既知の天体についてアンテナの仰角や大気の変化による入力信号強度の変化を考慮しながら

1. 30 分間の観測の最初と最後の強度が同様となるか
2. 2 天体を交互に観測し、毎回変換係数が同様となるか

を調べたい。

さらに、二素子干渉計での観測の前後に高萩局あるいは日立局で単一鏡の観測も行い、観測時に実際に入力されている信号強度との相関も確かめたい。これは、変換係数を求める際に使用した実際の天体の強度とした値が数十年前の論文の値であるため、現在その値から変化している可能性も考えられるからである。

変換係数を求めることができれば、検出限界の確認を行い、モニター観測化を実現したい。

3 山口-茨城 VLBI 観測システム

3.1 システムの立ち上げ

2016 年 7 月 5 日に山口大学にて山口大学の新沼浩太郎先生ご指導の下 PC を組み立て、OS のインストールを行った。翌 6 日に山口大学が運用するアンテナである山口局にてデータ転送ができるかを確認した。8 月 2 日に PC を茨城局に持ち込み、ネット環境の整備を行った。作成した PC が図 3.1 である。



図 3.1: 作成した PC

山口-茨城 VLBI 観測システムのデータ転送方法や再起動方法などは、後に付録として添付した。

3.2 考察・今後の展望

現在、山口大学では相関処理が実際にされているが、茨城局ではまだ実際に相関処理を行っていない。茨城局でも相関処理ができるか確認することが現段階の目標である。さらにモニター観測化に向けて、茨城局から山口局へのデータの移動をどう行かなどを考えていきたい。

4 まとめ

高萩-日立二素子干渉計

出力される相互相関強度から実際の強度へと変換する変換係数を求めるべく、観測を行った。今回の観測では全ての天体に対し矛盾なく適用できる変換係数を求めることができなかった。今後、まずは変換係数が求められなかった原因として考えられる、強度や位相が時間とともに変化する原因を探るための観測をしていきたい。また、実際の強度として使用した値は 20 年以上前の論文の値であったが今の天体の強度を用いて変換係数を求めるために二素子干渉計での観測の前後に単一鏡での観測も行いたい。

山口-茨城 VLBI 観測システム

観測システムは整い、山口局では相関処理ができることも確認された。茨城局でも相関処理が可能か確認し、モニター観測化に向けてデータの移動など現実的な問題について考えていきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり多くの方にご指導頂きましたこと、大変感謝しております。特に指導教諭の百瀬宗武教授、茨城大学宇宙教育センターの米倉覚則准教授には大変お世話になりました。研究発表の練習の際には丁寧にご指導していただき、また夜遅くの質問にもご対応くださいました。山口大学の新沼浩太郎准教授、藤沢健太教授にも、山口局との VLBI 観測システムを立ち上げる上でとてもお世話になりました。特に新沼先生はお忙しい中、山口出張の際に何も分からなかった私にいちから丁寧に説明をしてくださり、出張後の作業についての質問もメールで丁寧に教えてくださいました。研究員の杉山孝一郎氏、齋藤悠氏、澤田-佐藤聡子氏は、いつでも様々な質問に答えてくださり、研究に必要かと思われる内容等も併せてお教えくださいました。また、所属している電波天文研究室の皆さまは、少しの疑問にしっかり答えてくださったり、あるいは一緒に悩んでくださったりしました。ときには夜中まで発表練習をしたこともありました。本研究に関わってくださった方全員に心から感謝申し上げます。そして、電波天文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困ったときは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] Ott et al.(1994)
- [2] Yonekura et al.(2016)
- [3] "NRAO VLA Calibration and Flux Density Scale"
<https://science.nrao.edu/facilities/vla/docs/manuals/oss/performance/fdscale>,
2017 年 2 月アクセス
- [4] 中井直也 ほか編 『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 2009
- [5] 国立天文台編 『干渉計サマースクール 2005 教科書』
- [6] 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
- [7] 福井康雄 ほか編 『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 2008
- [8] 小山勝二 ほか編 『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 2007

付録 A 山口-茨城 VLBI 観測システム用 PC OCTADISC からの転送方法

◇script の編集

毎データ転送ごとに、そのデータ内容にあわせて書き換える。

/usr/local/OCTADISK2y/script/ にある、

- octadisk_play_start_iv4.exp
- octadisk_play_stop_iv4.exp

を編集する。

octadisk_play_start_iv4.exp

- 1). **# storage module 1 or 2** の項目で、
モジュールの差し口を指定する。
set pkg 1 ...module1 のデータを転送したい場合。
set pkg 2 ...module2 のデータを転送したい場合。
- 2). **#partition name** の項目で、
転送したいデータの OCTADISK 内のパーティション名を指定する。
set pname パーティション名
- 3). **#playback start data**
#playback end data の項目で、
転送したいデータの範囲を指定する。**start** が開始、**end** が終了。
それぞれ 16y196d09h25m00s と 16198092500 の両方の表記がある。どちらも編集。
実際は、**end** に指定した時刻の 1 秒後までが記録される。
- 4). **#file name** の項目で、
保存先のファイル名を指定する。
set file ファイル名
- 5). **# STRGPATH** の項目で、
HDD の **data1** か **data2** どちらに保存するかを選択する。（* 残容量を確認しておく）
set strg 1 ...data1 (sdb) に保存したい場合
set strg 2 ...data2 (sdc) に保存したい場合 （2016/08/02 現在）

`octadisk_play_stop_iv4.exp`

`start` のものの内容に合わせて `user edit` の範囲内を編集する。

◇ 実行する

1). ひとつの端末で、

`su` で `root` にして

`cd /usr/local/OCTADISK2y/` で移動。

`./octadisk2y` でサーバーを立ち上げる。

(SUCCESS と出れば OK。切断したいときは、`ctrl+C`。)

2). アプリケーションから、システムモニタを開いておく。

3). 新しい端末で、

`su` で `root` にして

`cd /usr/local/OCTADISK2y/script/` で移動

`./octadisk_play_start_iv4.exp` で、データ転送開始。

転送開始 15 秒前からカウントされる。

◇ 中断したいとき

`script` のディレクトリ内で

`./octadisk_play_stop_iv4.exp`

にすると中断。

◇ 再度、転送を開始したいとき

保存したいファイル名と同じものがあるとエラーが出るので、

`mnt/data1` や `mnt/data2` 内の、転送を中断したファイルを削除するか
ファイル名を変更してから実行する。

付録 B 山口-茨城 VLBI 観測システム用 PC 再起動後のマウント処理方法

```
ターミナルにて  
su  
... root になる  
dmesg | grep sd  
... RAIDBOX に何という名前が割り振られているか確認 (sda,sdb など)  
mount -t xfs /dev/sdb /mnt/data1  
mount -t xfs /dev/sdc /mnt/data2  
... マウントする (RAIDBOX に sdb と sdc が割り振られている場合。)
```

注記

PC 本体の、コードの差し位置などで RAIDBOX に振り分けられる名前が変わる可能性がある。だが、数回試してみたところどこに差ししても一方の RAIDBOX に sdb、もう一方に sdc が割り振られ、変わらないようだった。ゆえに、sdb を data1、sdc を data2 としてマウントすることとする。
(2016 年 8 月 2 日現在)