



1.85m電波望遠鏡FFT電波分光計システムの安定性の評価

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2010-05-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 秋里, 昂, 土橋, 一仁, 西浦, 慎悟, 海田, 正大, 栗本, 裕巖, 木村, 公洋, 阿部, 安宏, 米倉, 覚則, 大西, 利和, 小川, 英夫, 半田, 利弘, 中島, 拓, 久野, 成夫 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2309/107116

1.85m 電波望遠鏡 FFT 電波分光計システムの安定性の評価

秋里 昂*, 土橋 一仁*, 西浦 慎悟*, 海田 正大**, 栗本 裕巖**,
木村 公洋**, 阿部 安宏**, 米倉 覚則**, 大西 利和**, 小川 英夫**,
半田 利弘***, 中島 拓****, 久野 成夫****

宇宙地球科学

(2009年5月20日受理)

AKISATO, K., DOBASHI, K., NISHIURA, S., KAIDEN, M., KURIMOTO, H., KIMURA, K., ABE, Y., YONEKURA, Y., ONISHI, T., OGAWA, H., HANDA, T., NAKAJIMA, T. and KUNO, N.: Performance of the FFT spectrometer system for the 1.85m radio telescope. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Division of Natur. Sci., **61**: 63-71. (2009) ISSN 1880-4330

Abstract

We are developing a 1.85m single dish telescope for submillimeter/millimeter radio astronomy, and are planning to install AC240, the digital spectrometer produced by Acqiris (Co.), covering a wide frequency range of 1GHz. The purpose of this paper is to report results of experiments to measure the performance of the spectrometer as well as to find a practical usage for stable operation during the actual astronomical observations. As a result, we find that a precise control of temperature is definitely needed to stabilize the spectrometer; a slight change of $\sim 1^{\circ}\text{C}$ in the temperature of the Field Programmable Gate Array (FPGA) board which performs the Fast Fourier Transformation (FFT) inside AC240 results in $\sim 1\%$ change of the output power. For this, we decided to keep the spectrometer in a thermostatic bath during the astronomical observations, which suppresses the drift of the FPGA board temperature and the final output power to $\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ and $\sim 0.2\%$, respectively. We also find that the ambient temperature around AC240 should be kept at less than 22°C , so that the temperature of the FPGA board does not exceed the upper limit (60°C) for a safe operation as stated in its user's manual. In order to assess the total stability of AC240, we measured the Allan variance leaving AC240 in the thermostatic bath. Resulting Allan plots show the minimum variance at the continuous integration time of ~ 1000 sec, which is much longer than that of a traditional acousto-optical spectrometer (typically ~ 30 sec).

Key words: radio astronomy, digital spectrometer, FFT, Acqiris AC240

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 我々は口径1.85mのミリ波・サブミリ波電波望遠鏡の開発に取り組んでおり、同望遠鏡の分光計としてAcqiris社製の帯域1GHzのデジタル分光計AC240の導入を試みている。本研究では、この分光計の性能評価実験を行い、その観測時の使用条件を明らかにした。実験の結果、AC240を使用する際には温度環境の安定化が必須であ

* 東京学芸大学 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)
** 大阪府立大学 (559-8531 堺市中区学園町 1-1)
*** 東京大学 (113-0033 文京区本郷 7-3-1)
**** 国立天文台 (384-1305 南佐久郡南牧村野辺山 462-2)

ることがわかった。分光計周囲の温度変化に応じて高速フーリエ変換を行うField Programmable Gate Array (FPGA) Boardの温度が1℃変動すると、約1%の出力変動が起きることが明らかになった。そこで、実際の観測ではAC240本体を恒温槽に入れ、その温度変動を約0.2℃以下に保つことにした。これにより、出力変動を0.2%まで抑える事が可能となった。また、FPGA Boardの温度が使用条件の上限(60℃)を超えないように、分光計周囲の温度を22℃以下に抑えることも必要であることが明らかになった。AC240を恒温槽に入れた状態でシステムの安定性の指標であるアラン分散安定時間を測定したところ、単一のチャンネルのアラン分散安定時間は約1000秒という結果になった。これは、従来使用されている音響光学型分光計の値(約30秒)と比べて、格段に長いものである。

1. はじめに

我々は、口径1.85mのミリ波・サブミリ波電波望遠鏡の開発を行っている(以下1.85m電波望遠鏡という)。1.85m電波望遠鏡は、国立天文台野辺山宇宙電波観測所構内に設置された大阪府立大学、東京学芸大学、東京大学の3大学が共同で開発している望遠鏡である。200GHz帯で3'の空間分解能を持ち、ミリ波・サブミリ波帯での北天分子雲のサーベイ観測を目的としている。受信機には2SB受信機を使用し、 $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 、 $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}(J=2-1)$ の3周波数を同時に観測することが可能である。また「レドーム」と呼ばれる電波を通過させるカバーでアンテナを覆い、雨や風の影響を少なくするための工夫もされている(図1)。近年、A/D Board, Field Programmable Gate Array (以下FPGA) Board等の高性能化に伴いリアルタイムでの高速フーリエ変換



図1 1.85m電波望遠鏡

(Fast Fourier Transformation: 以下FFT)によるミリ波・サブミリ波の分光観測が可能になってきた。現在、我々は1.85m電波望遠鏡の分光計としてAcqiris社製の帯域1GHzのデジタル分光計AC240を導入している(図2)。本稿では、この分光計の性能評価実験の結果、ならびに実際の観測時における使用条件について報告する。

2. AC240の性能評価実験

AC240の性能のカatalog値を表1にまとめる。3.4節で述べるように、この分光計は従来使用されている音響光学型分光計(Acousto-Optical Spectrometer: 以下AOS, 例えば、海田ほか2006)と比べて、①帯域が広い、②アラン分散安定時間が2桁長い、③手作業による細かい調整が不要、という非常に優れた特徴を持っている。AC240は、すでに日本や中国、ヨーロッパに設置された幾つかの望遠鏡で使用されているが、過酷な観測サイトにおける温度等の使用条件については、必ずしも明らかにされていない。そこで我々は、実際にAC240を使用する観測サイトで、以下に示す5つの性能評価実験を行い、この分光計の使用条件を明らかにした。

- ① リニアリティ(線形性)の測定
- ② 高周波成分(1GHz以上)の漏れ込み評価



図2 AC240

表1 AC240の性能 (カタログから抜粋)

帯域	0 ~ 1 GHz
サンプリングレート	2 GS/s at 8 bit
チャンネル数	16384ch
ダイナミックレンジ	40dB
チャンネル間隔	61.035kHz
周波数分解能	54kHz (No FFT Window), 94kHz (Blackman Window)
アラン分散安定時間	2000 秒以上 (温度変化± 0.2℃ 以下の場合)

- ③ 周波数分解能の測定
- ④ アラン分散安定時間の測定
- ⑤ 温度環境の変動による影響の調査

3. 実験の概要と結果

3.1 リニアリティ (線形性) の測定

Signal Generator (以下SG) から500MHzの信号を分光計に入力し、入力信号を-40dBmから1 dBおきに変化させてリニアリティ (線形性) の測定を行った。結果を図3に示す。図の横軸・縦軸は、ともにdBmスケールである。図から明らかなように、デジタル分光計AC240のダイナミックレンジは、カタログ値の40dBが確保されていることがわかる。また、入力が-40 dBmから5 dBmの測定値を1次の最小二乗法でフィットした場合の相関係数Rの値は0.999であり、十分リニアリティが保たれている事を確認した。

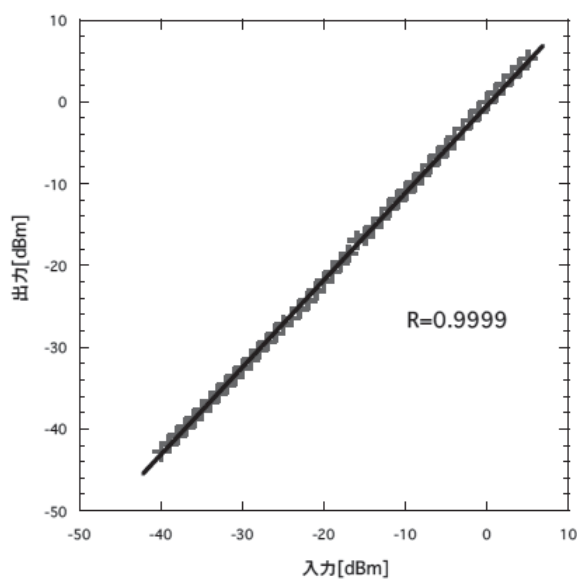


図3 リニアリティ (線形性) の測定結果。横軸・縦軸ともにdBmスケールである。+印は測定値であり、実線は1次の最小二乗法でフィットしたものの。

3.2 高周波成分 (1GHz以上) の漏れ込み評価

FFTを用いた分光計は、分光可能な帯域外の周波数を持つ信号が入力されると、帯域内に折り返されて測定されるという特性を持つ。例えば、周波数1.2GHzの信号を入力すると、0.8GHzの周波数を持つ信号として測定される。このため、AC240を使用する場合、1 GHz以上の周波数成分を除去することが必要となる。そこで、SGから特定の信号を入力し、折り返しで入力される信号レベルの評価を行った (図4)。その結果、1.2GHz入力時は0.8GHzに入力よりも3.5dB低い出力が現れ、1.5GHz入力時は0.5GHzに入力より8.7dB低い出力が現れることがわかり、AC240には1GHz以上の周波数をカットするフィルターがすでに内蔵されていることを確認した。入力周波数が高くなるに従って折り返し出力の強度は低くなる傾向があるが、未だ高いレベルの漏れ込みがある事は問題であり、スカート特性の優れた低周波通過型フィルター (ローパスフィルター) を入力回路側に挿入する必要がある事がわかった。0~1GHzの帯域を確保できるフィルターの制作を現在行っている。

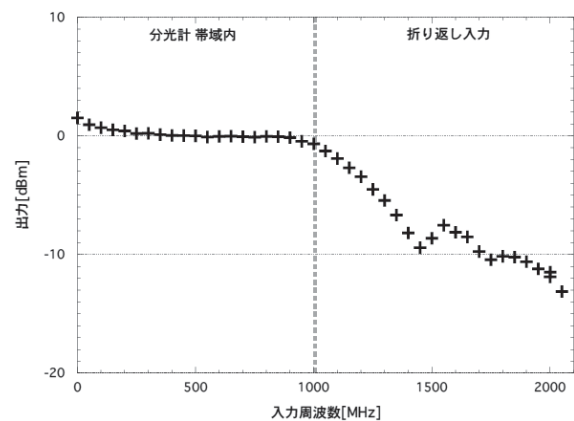


図4 高周波数成分の漏れ込み評価。点線 (1 GHz) より左側は分光計の帯域内の信号強度を示し、右側は帯域外の信号強度を示している。1000~1500MHzにかけて信号強度が落ちていく様子が確認できる。これは、AC240に内蔵されたフィルターによる効果であると考えられる。

3.3 周波数分解能の測定

SGを用いて、1kHzおきに入力信号を変化させることにより、フィルターカーブの測定を行った。AC240には4つの窓関数が用意されており、用途に応じて窓関数を選択する仕様となっている。図5は4つの異なる窓関数を用いた場合のフィルターカーブである。測定条件や得られたフィルターカーブの特徴を、表2にまとめる。

一般に分光計の分解能については、①サイドローブレベルが低いこと、②周波数分解能がチャンネル間隔の

2倍以上(ナイキストサンプリング)になっていること、という条件が満たされていることが望ましい。AC240のチャンネル間隔は61kHzであるので、122kHzより低い分解能が必要だが、実際にはそれに見合うフィルターカーブは得られないことが明らかになった。つまり、AC240は常にアンダーサンプリング状態にある。このため、一般的によく使用されているHanning窓関数を使用した場合でも、30.5kHz(チャンネル間隔の半分)ずれた信号強度を3割程度低く見積もってしまう。上記の2つの

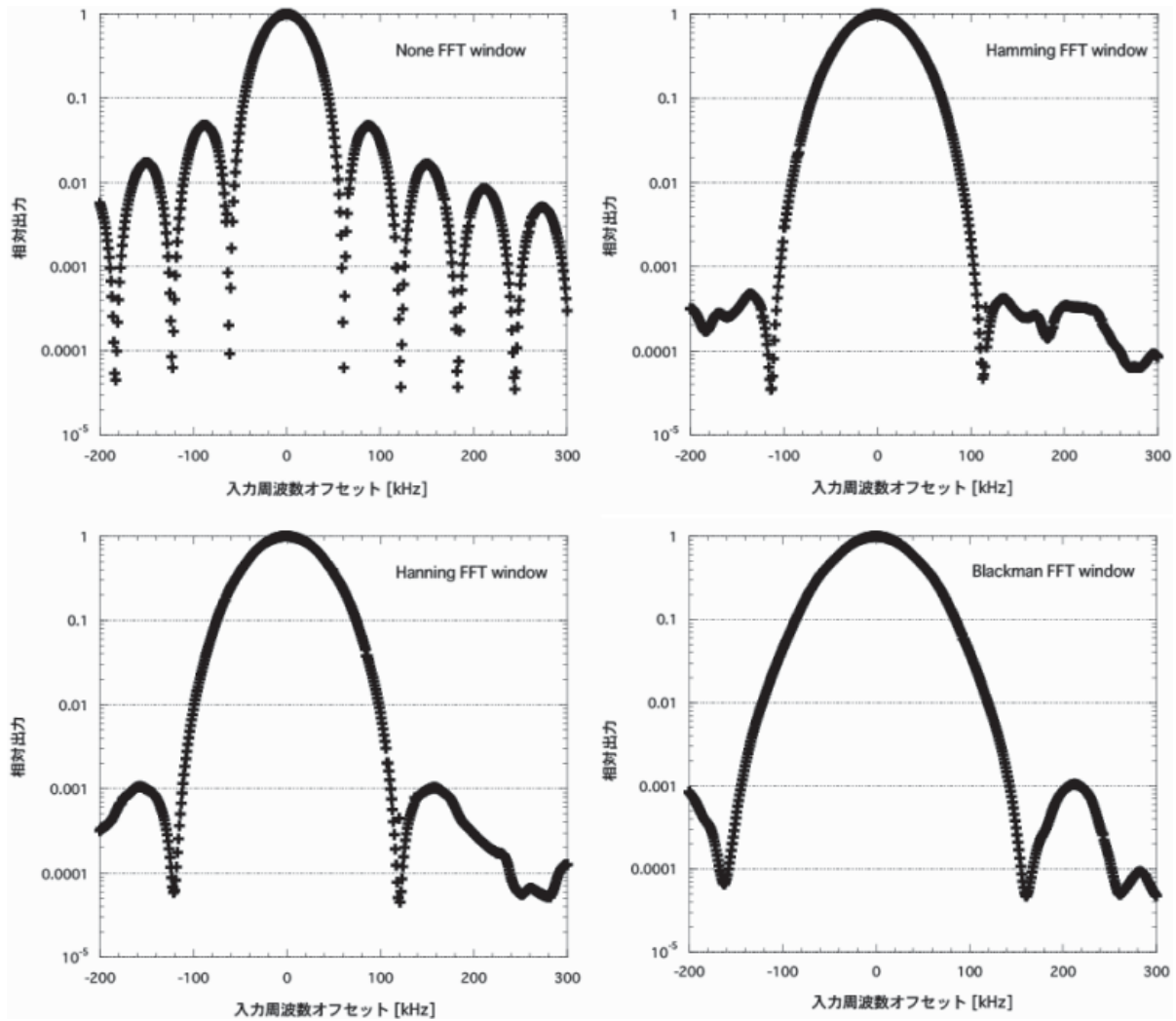


図5 フィルターカーブ測定結果。AC240には4つの窓関数が用意されており、用途に応じて窓関数を選択する仕様となっている。左上は窓関数を着けない場合のフィルターカーブ (None Window), 右上はHamming, 左下はHanning, 右下はBlackman窓関数を使用したときのそれぞれのフィルターカーブである。

表2 窓関数別のフィルターカーブの特徴

FFT window	Channel 間隔	分解能 * ¹	サイドローブレベル * ²	0.5ch 点での信号強度 * ³
None	61kHz	54kHz	4.7%	41%
Hamming	61kHz	79kHz	0.05%	67%
Hanning	61kHz	85kHz	0.11%	71%
Blackman	61kHz	94kHz	0.10%	74%

条件①・②を考慮し, 一般的な観測では一番分解能が低い Blackman 窓関数を使用することを現在検討している。また, ナイキストサンプリングを達成することができるよう, 新しい窓関数の開発も検討している。

3.4 アラン分散安定時間の測定

分光計の安定性を評価するために, アラン分散および分光アラン分散安定時間 (例えば, Schieder et al. 1989; Kooi et al. 2000) の測定を行った。これはシステムがどれだけ安定かを示す時間的な指標である。宇宙電波は微弱なので, 十分な Signal to Noise ratio (以下 S/N 比) を達成するためには, 長い積分時間が必要となる。実際に観測されるデータには, ランダムノイズに加え大気の変動, 装置のドリフト等が含まれている。ドリフトが卓越する時間スケールで積分しても, データの S/N 比は必ずしも向上しない。大気は 20 秒~1 分程度のタイムスケールで変動する。従って, 効率よく観測を行うためには, 観測装置に起因するドリフトのタイムスケールはそれよりも長くなることが望ましい (アラン分散の概要については, 海田ほか 2006)。

入力信号として人工的なノイズ源である White Noise Source (以下 WNS) を使用し, AC240 のアラン分散安定時間の測定実験を行った。測定中は, 室温が一定になるように注意した。図 6 に実験で使用した WNS のブロック図とレベルダイアグラムを示す。また, 実験結果を図 7 に示す。図 7 の左の図は単一のチャンネルのアラン分散

変動, 装置のドリフト等が含まれている。ドリフトが卓越する時間スケールで積分しても, データの S/N 比は必ずしも向上しない。大気は 20 秒~1 分程度のタイムスケールで変動する。従って, 効率よく観測を行うためには, 観測装置に起因するドリフトのタイムスケールはそれよりも長くなることが望ましい (アラン分散の概要については, 海田ほか 2006)。

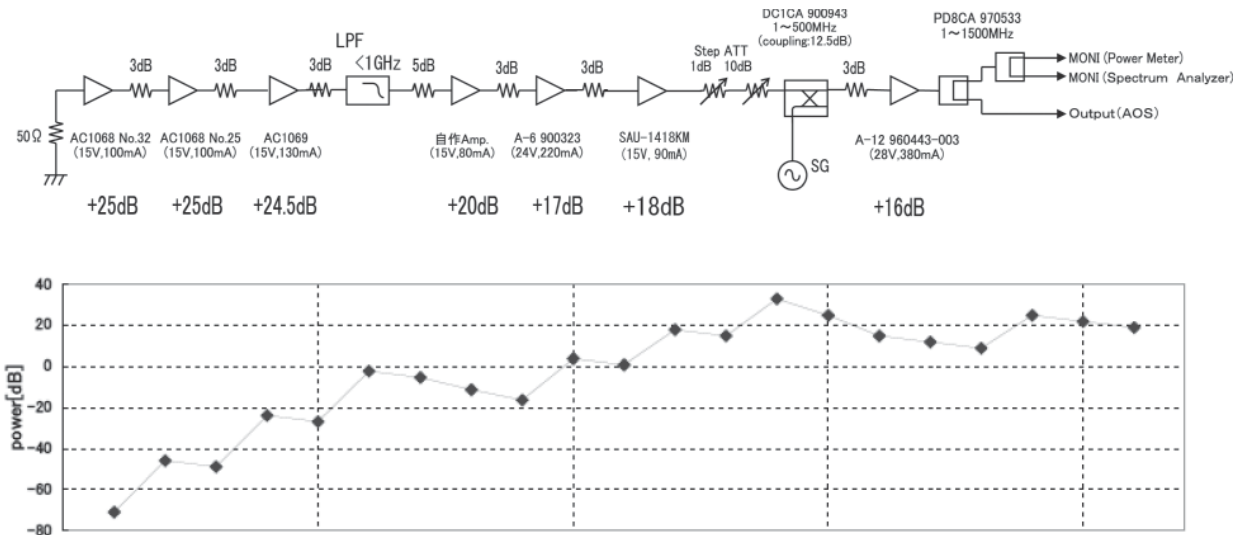


図6 実験に使用した WNS のブロック図 (上) とレベルダイアグラム (下)。

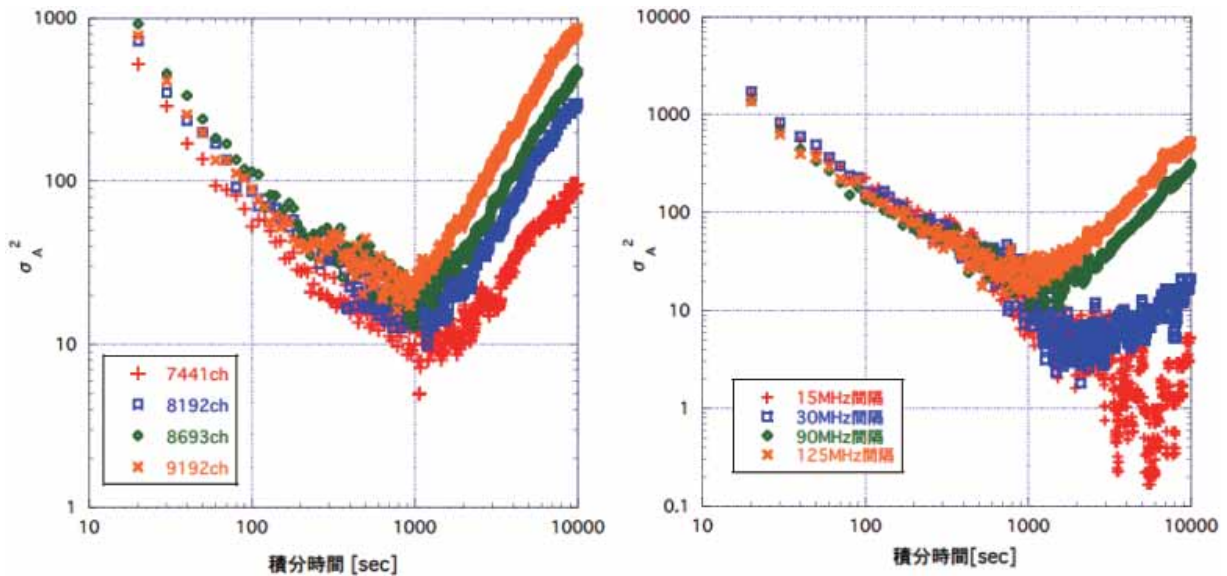


図7 アラン分散安定時間の測定結果。左は単一のチャンネルのアラン分散を示し, 右は周波数間隔が 15, 30, 90, 125MHz のときの分光アラン分散を示している。

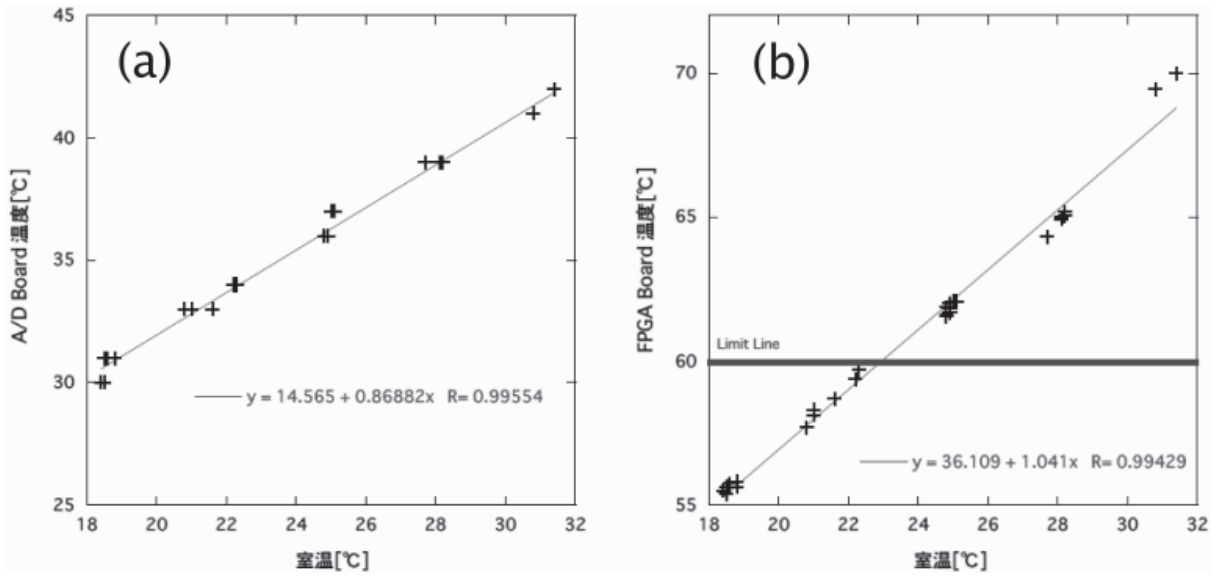


図8 室温対分光計内の温度。(a)はA/D Board温度, (b)はFPGA Board温度の室温に対する変化を示している。(b)の太線「Limit Line」は、カタログに記載されたFPGA Boardの使用上限温度60°Cを示す。

散を示し、右の図は周波数間隔が15, 30, 90, 125MHzのときの分光アラン分散を示している。アラン分散安定時間は概ね1000秒という結果になり、同程度の分解能を持つAOSと比較して安定である(AOSの場合、安定時間は概ね30秒、海田ほか 2006)。また、分光アラン分散は1000秒以上となり、周波数間隔によって異なることを確認した。このときのFPGA Boardの温度変化は±0.7°Cであった。カタログ値では「温度変化±0.2°Cのとき、安定時間2000秒」となっているが、実際に得られた安定時間はこの半分程度である。おそらく、温度環境の改善が課題であると考えられる。

3.5 温度環境の変動による影響の調査

東京学芸大学内の実験室で、室温を変化させたときの分光計内の温度を測定した。結果は図8のようになった。図8(a)は室温に対するA/D Boardの温度変化, (b)は室温に対するFPGA Boardの温度変化である。2つのBoardの温度は、室温の変化に対して線形である事が確認できた。また、FFT演算中のFPGA Boardの温度はA/D Boardの温度より約25°C高温で安定となることもわかった。カタログにはFPGA Boardの温度は60°C以上にはならないよう注意書きがなされているので、図8(b)から、観測室の室温(あるいは分光計周囲の温度)を22°C以下にする必要がある事がわかった。なお、FPGA Boardの温度が70°Cに達すると、分光計内で自動的にロック機能が働き、FFT演算が中止されて出力が不連続となることが確認できた。

また図9に示すように、FFT演算開始直後に分光デー

タの強度が急激に変化することがわかった。この図はSGから500MHzの信号を入力し、FPGA Boardの温度変化(灰)と500MHzに対応する8192chの出力変化(黒)を示したものである。この変化は、FPGA Boardの温度変化と反相関が見られることから、入力信号の強度が変化したのではなく、分光計のゲインが時間変化しているものであると考えられる。出力強度は測定開始時よりも約4%減少して安定することがわかった。

この結果から、①FPGA Boardの温度変化と出力には反相関があることがわかったので、FPGA Boardの温度が安定となるFFT開始から1000秒以後のデータを使用する、②FFT演算を中止するとFPGA Boardの温度が変化

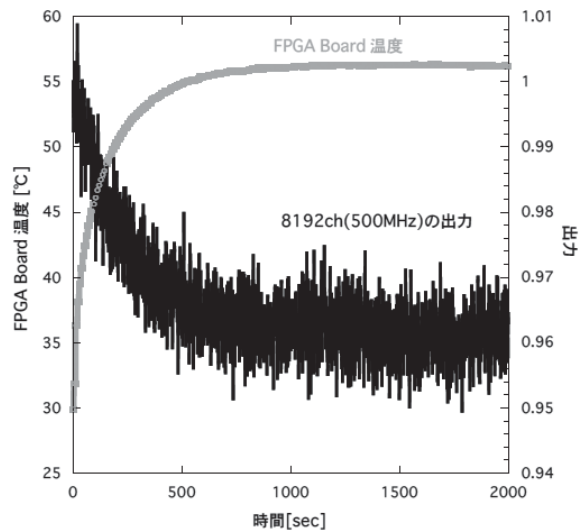


図9 FFT開始から2000秒までのFPGA Boardの温度変化(灰)と8192chの出力変化(黒)。右縦軸の出力は測定開始時の値を1とした。

してしまうので、観測時はFFTを常に行っている状態にする必要がある、③分光計内の温度が一定となるように、室温の安定化が必須である、という温度に関する3つの使用条件が明らかになった。

この実験を基にして、2008年10月に分光計を1.85m望遠鏡観測室に配置し、実際の観測サイトにおいて同様の実験を行った。なお、実験にはヤマト科学株式会社製の恒温槽を使用し、分光計の温度が安定になるようにした。

3.5.1 安定性の評価

AC240を恒温槽の中に入れ、WNSを恒温槽の外に置いた。10時間連続で1秒おきにデータを取り込み、恒温槽の中と外の温度変化をモニターした。結果は図10のようになった。測定開始直後はFFTによる高速サンプリングのため、赤色で示すFPGA Boardの温度と、黒色で示す恒温槽内の温度が急激に上昇している。分光計AC240を恒温槽に入れた場合、恒温槽内の温度が安定するには2時間以上かかることがわかった。恒温槽内の温度が安定となったとき、その後の温度変化は約0.2℃であり、観測室内の温度変化(約0.5℃)に比べて安定であることがわかった。恒温槽内の温度とFPGA Boardの温度は同じような時間変化を示しており、両者とも温度変化は約0.2℃である。また、18000秒に見られるFPGA Boardの“山”は恒温槽内の温度が微妙に変化していることが原因として考えられる。このようなFPGA Boardの急な温度変化はこれまでもたびたび見られた。今後、更に長時間の分光計と恒温槽の温度モニターを行い、原因を究明する必要がある。

図11は、図10のデータを取得したときの6144, 8192, 10239chの出力変化をプロットしたものである。各チャンネルは順に250, 500, 750MHzに対応する。図の各

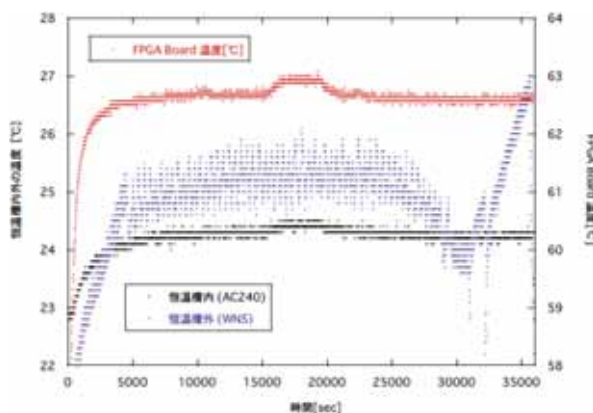


図10 恒温槽を用いて、分光計内外の温度変化を測定した。横軸は時間、縦軸は温度である。赤色は分光計内のFPGA Boardの温度変化、黒色は恒温槽内の温度変化、紫色は恒温槽外の温度変化(観測室の室温変化)を示している。

チャンネルの出力は実験開始時のカウント値を1とした。図11において32000秒あたりに見られる出力変化は、図10の恒温槽外(観測室内)の温度変化(紫色)によく対応している。この出力変化は、観測室の扉を開けた際、外の冷たい空気が観測室内に流入したためである。この結果から、WNSには温度依存性があるものと思われる。図11において比較的出力が安定している10000~25000秒のデータを用いて、3.4節と同様にしてアラン分散の測定を行った。結果を図12に示す。単一チャンネルのアラン分散安定時間はおおよそ1000秒である。また、分光アラン分散の安定時間もおおよそ1000秒となった。これは、東京学芸大学の実験室の結果(3.4節図7)と一致している。分光計周囲の温度変化が±0.2℃であるにもかかわらず、3.4節で述べたカタログ値2000秒は達成されていない。おそらくWNSの温度依存性によるものであると考えられる。

3.5.2 温度依存性の評価

AC240を恒温槽の外に置き、WNSを恒温槽の中に入れて、AC240にどのような温度依存性があるかを調べた。外気温の低い夜に実験を行うと、観測室の扉を開け閉めする事により、室温を大きく変化させる事ができる。1時間連続で1秒おきにデータを取り込み、扉を開け閉めしながら恒温槽の中と外の温度変化をモニターした。結果は図13のようになった。この図から、観測室の室温変化(紫色)に対してFPGA Boardの温度(赤色)がわずかに遅れて上下し、両者の温度変化がよく対応している

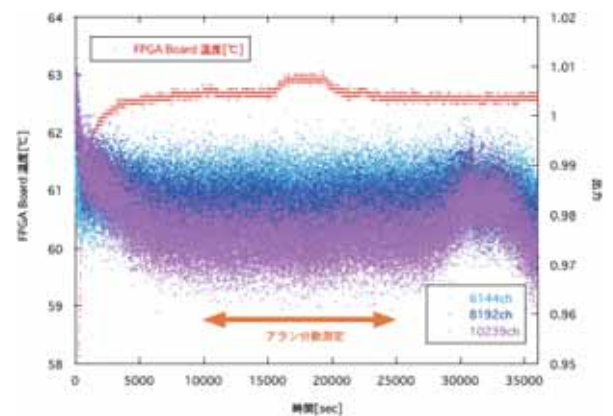


図11 FPGA Boardの温度と6144, 8192, 10239chの出力変化のプロット。各チャンネルは順に250, 500, 750MHzに対応する。横軸は時間、縦軸は温度と各チャンネルの出力である。出力値は実験開始時の値を1とした。32000秒あたりに見られる出力変化は、図10の恒温槽外(観測室内)の温度変化(水色)によく対応している。この温度低下は、観測室の扉を開けた際、外の冷たい空気が観測室内に流入したためである。橙矢印はアラン分散を測定した時間範囲を示す。

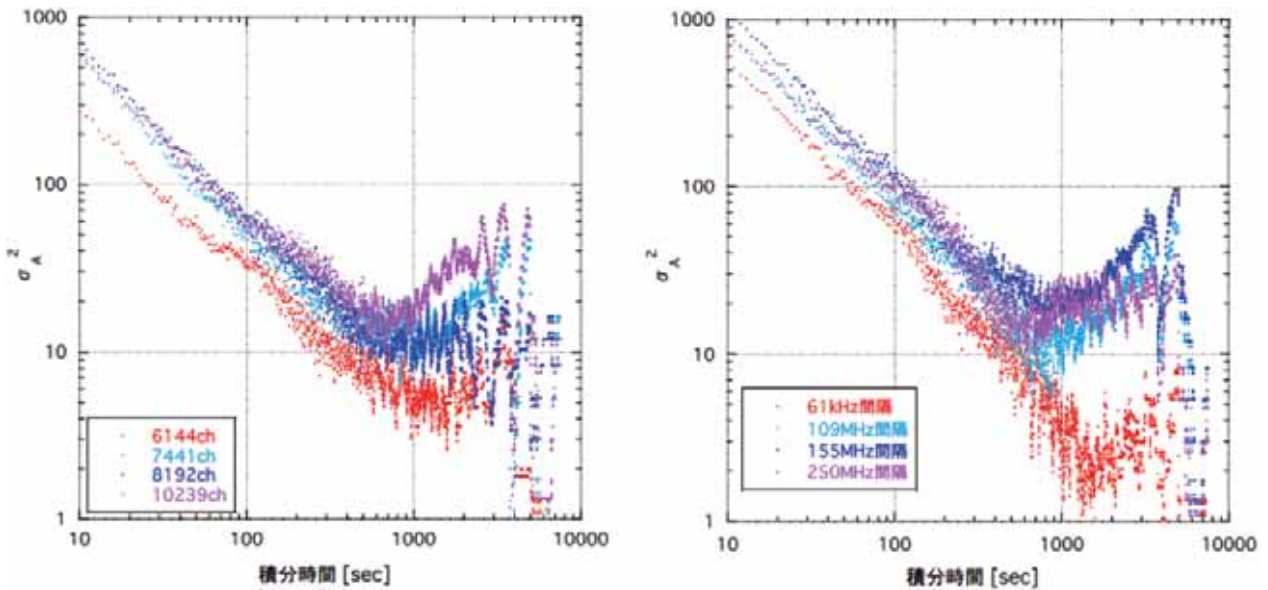


図12 アラン分散の測定結果。左は単一のチャンネルのアラン分散を示し、右は周波数間隔が61kHz, 109, 155, 250kHzのときの分光アラン分散を示している。

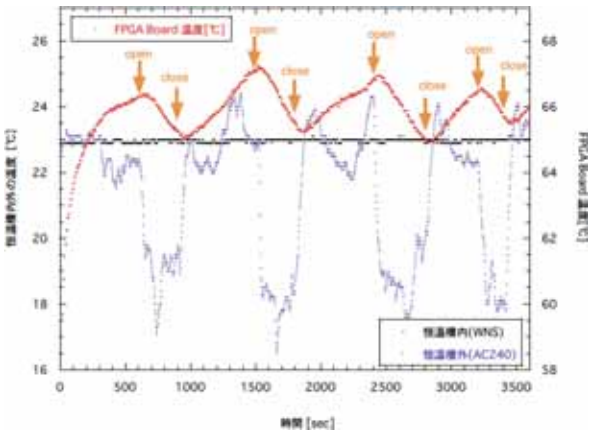


図13 AC240を恒温槽の外に置き、観測室の室温を大きく変化させたときの恒温槽内外、ならびに分光計内の温度変化。横軸は時間、縦軸は温度である。赤色は分光計内のFPGA Boardの温度変化を示し、黒色は恒温槽内の温度変化、紫色は恒温槽外の温度変化を示している。橙色で示す矢印は観測室の扉を開け閉めた時間を示す。室温変化に対してFPGA Boardの温度がわずかに遅れて上下し、両者の温度変化がよく対応していることがわかる。

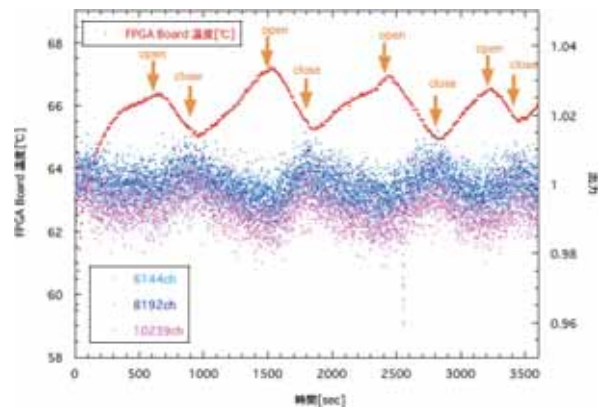


図14 FPGA Boardの温度と6144, 8192, 10239chの出力変化をプロットした。横軸は時間、縦軸は温度と出力である。図11と同じように、各チャンネルの出力は実験開始時のカウント値を1とした。橙色で示す矢印は観測室の扉を開け閉めた時間を示す。FPGA Boardの温度変化に伴って出力が変動している様子がわかる。

約0.2℃であるので、出力変動を0.2%まで抑えることが可能である。

ることがわかる。このときの各チャンネル (6144, 8192, 10239ch) の出力変化は図14のようになった。FPGA Boardの温度変化に伴って出力が変動している様子がわかる。WNSは恒温槽の中にあるので(温度変化約0.2℃)、図14の変動はAC240に温度依存性があることを示唆している。FPGA Boardの温度が1℃変動することにより、約1%の出力変動があることがわかった。以上の結果より、観測のときには分光計を恒温槽に入れて使用する必要があることが明らかになった。恒温槽内の温度変化は

4. まとめ

本研究では、Acqiris社製のFFT型電波分光計AC240の性能評価実験を行った。主な結果を以下にまとめる。

- (1) ダイナミックレンジ40dB以上に渡り、AC240のリニアリティ (線形性) を確認した (図3)。
- (2) 高周波数の漏れ込みを測定し、折り返しで入力される信号レベルを図4のように確認した。この問題を解決するために、入力回路側にローパスフィル

- ターを挿入して漏れ込みを除去することを検討している。
- (3) 周波数分解能の測定を行った結果, AC240にプレインストールされている4つの窓関数ではナイキストサンプリングを実現できないことがわかった。実際の観測では, 最もナイキストサンプリングに近い結果(チャンネル間隔61kHzに対して周波数分解能94kHz)が得られるBlackman窓関数を使用するか, 新たに窓関数を作成する必要がある。
- (4) 温度環境の安定化が必須であることが判明したので, AC240全体を恒温槽の中で稼働させることにした。これにより, 温度変化を約0.2℃に抑えることが可能となる。また, 温度の安定化を図るため, 観測時にはFFT演算を常に行っている状態にする必要がある。
- (5) AC240を恒温槽に入れた場合, 恒温槽内の温度が安定するには2時間以上かかる。また, FPGA Boardの温度が1℃変動することにより, 約1%の出力変動が起こる事がわかった。恒温槽内の温度変化は約0.2℃であるので, 恒温槽を使用すること

により出力変動を0.2%まで抑えることが可能である。

- (6) 室温が安定した実験室や観測サイトに設置された恒温槽内でのAC240のアラン分散安定時間は, 概ね1000秒である。

引用文献

- Benz, A. O., Grigis, P. C., Hungerbuhler, V., Meyer, H., Monstein, C., Stuber, B., & Zardet, D. 2005, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 442, pp.767-773
- Kooi, J. W., Chattopadhyay, G., Thielman, M., Phollips, T. G., & Schieder, R. 2000, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 21, pp.689-716
- Schieder, R., Tolls, V., & Winnewisser, G. 1989, *Experimental Astronomy*, vol. 1, pp.101-121
- 海田正大, 土橋一仁, 西浦慎悟, 小川英夫, 米倉覚則, 中島拓, 半田利弘, 河野孝太郎, 森野潤一 2006, *東京学芸大学紀要, 自然科学系*, vol. 58, pp.131-149