

第16章

観測システム

新井宏二¹(TAMA report 2002 の該当部分を引用)

観測システムとは、干渉計本体やデータ取得部と連携をとりながら、観測シフト担当者の観測遂行を補助するシステムである。図 16.1 に DT6 時の TAMA300 の観測システムを示した。観測システムは自動ロックシステム、モニター/診断系、干渉計調整、シフト担当者によって構成されている。

自動ロックシステムは、干渉計を自動的にロックし、観測可能な状態にするものである。シフト担当者はモニター/診断系を利用して検出器の動作をチェックし、調整が必要かどうかなどの判断を行う。調整が必要と判断されると、検出器にあらかじめ用意した調整機構を用いて干渉計の性能を最大限引き出すよう調整を行う。シフト担当者は観測体制に基づいて交代を行う。

以下では、自動ロックシステム、モニター/診断系、干渉計調整、観測体制について順に述べる。

16.1 自動ロックシステム

自動ロックシステムは、干渉計のロック、ロック直後のサブシステム (アラインメント系などの起動)、観測用信号源への制御信号切替などの作業を自動的に行うものである。これらの各段階では回路のスイッチ操作、回路のゲインやオフセット電圧の調整などが必要であり、もともと TAMA300 ではこれを手作業で行っていた。これらは以下のような理由から自動的に行うのが望ましい。

- 数ある回路の中で状況に応じて正しいスイッチ・調整ダイヤルを適切な量だけ操作するのは、干渉計操作についてある程度の経験が必要であり、これが可能な人間の人数は限られている。(操作に関するトレーニングはこの人数を増やすためにはあまり効果が無かった。)
- アンロックごとにアンロック後のスイッチング/干渉計のロック/信号切り替えの操作を行うのは、担当者に肉体的・精神的に負担を強いるものであり、前項と合わせて考えると数ヶ月規模の観測でこれを人間が行うのは理知的な選択ではない。
- 人間が達成できるスイッチングの速度・調整の精度では、ロック/信号切り替えの操作には不十分であり、これらに失敗することがたびたびある。

¹国立天文台

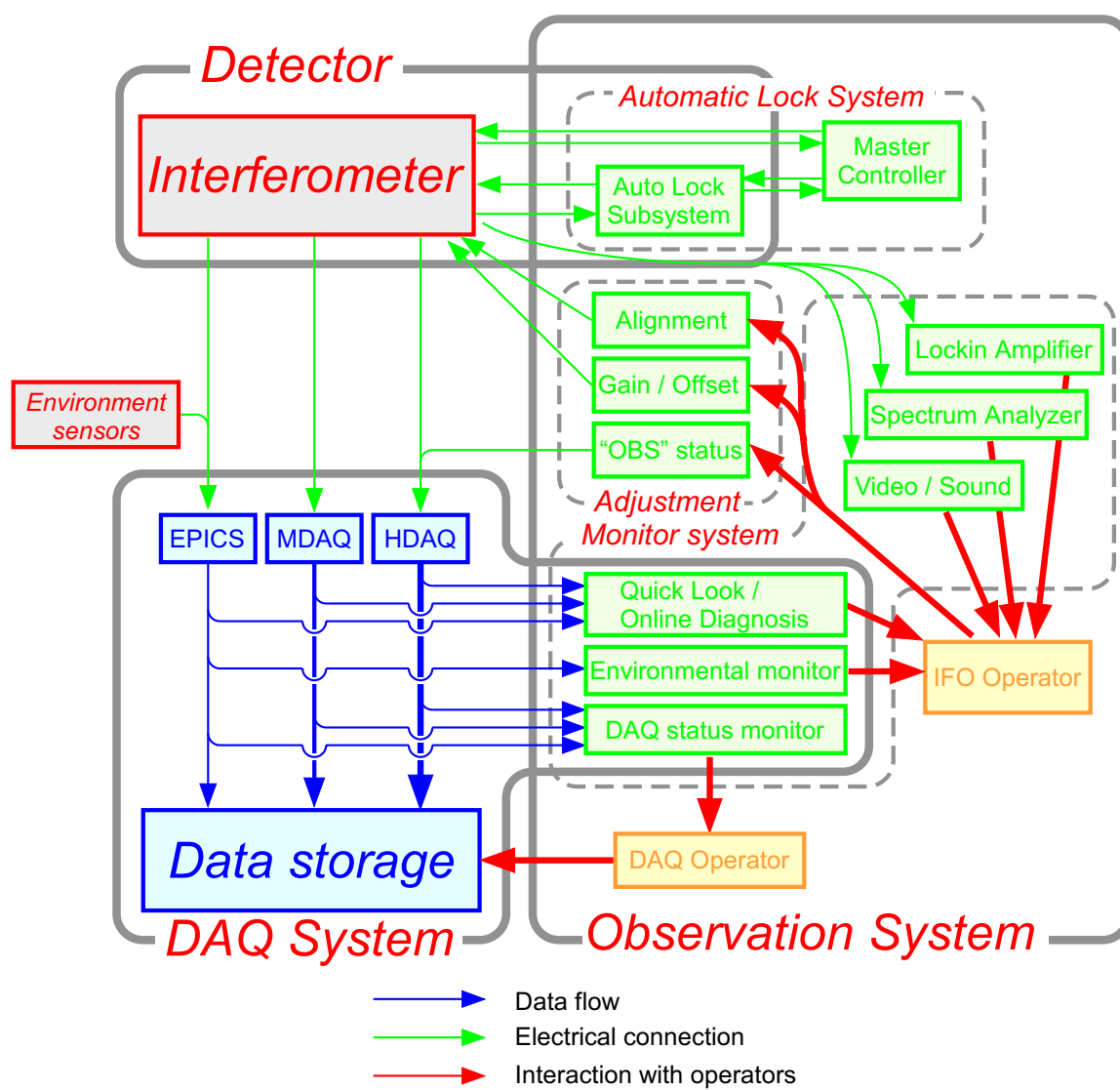


図 16.1: DT6 時の観測システム。

TAMA300 の自動ロックシステムはサブシステムとマスターコントローラーからなっている。サブシステムは、周囲からの入力信号により状況を判断しながらそれ自体が自律的に動作するハードウェアもしくはソフトウェアで、現在各腕のロックアクイジション自動化・腕アラインメント制御 ON/OFF 自動化・光軸制御 ON/OFF 自動化・モードクリーナーアラインメント制御 ON/OFF 自動化がサブシステム化されている。モードクリーナーのロックは従来マスターコントローラーによって自動化されていたが、これをサブシステム化する作業が進められている。

マスターコントローラーは、サブシステムと連携を取りながら、全体のロック作業を統括している。一部のサブシステム化されていない制御回路の調整に関してもマスターコントローラーが担当している。ハードウェアは PC に ADC, DAC, Digital I/O, デジタル制御のリレーなどの拡張カードを取り付けて構成し、これらを LabWindows/CVI で作成したソフトウェアで制御している。

16.2 モニターと診断システム

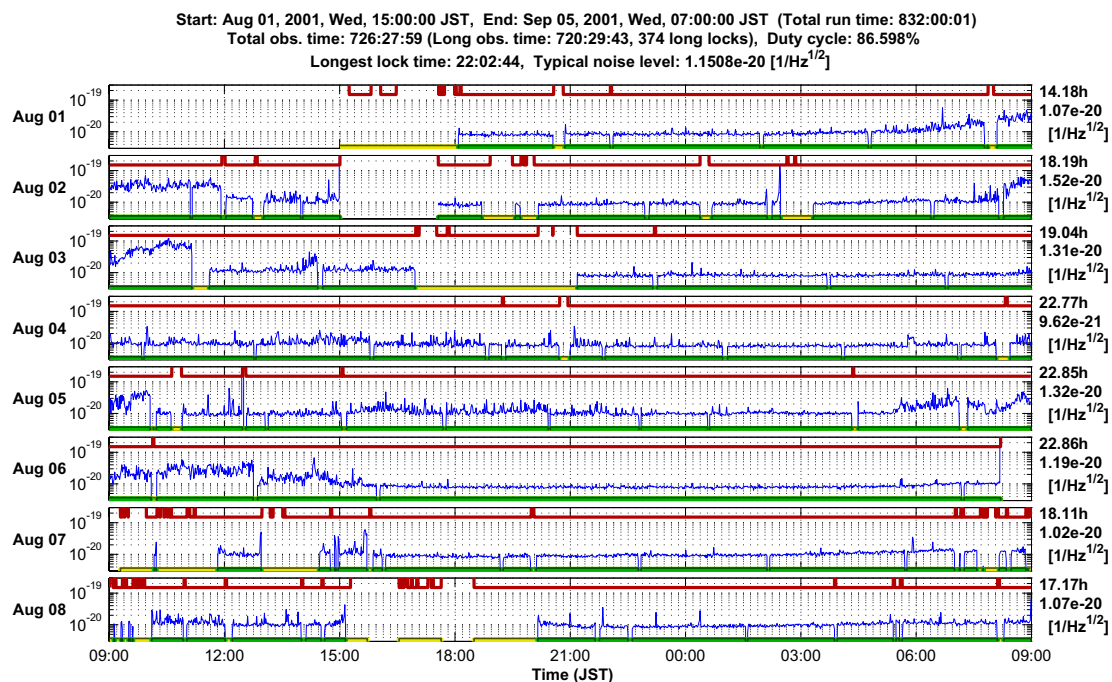


図 16.2: DT6 時の観測状況モニタプログラムの表示例。この図では、一週間分の干渉計雑音レベル、観測状況、データ取得状況、干渉計の動作状況などが表示されている。

レーザー干渉計重力波検出器は非常に精密な観測装置であるため、その感度は、地面振動や音など、様々な外乱の影響を受け易い。また、長期観測時には、気温や大気圧といった環境の変化によるドリフトの影響を受けることもある。防振装置や真空槽、制御系等は、これらの影響をできる限り抑圧するように設計されているが、それでも抑えきれない残留成分も残ってしまう。また、干渉計の状態のみならず、データ取得系も観測中滞りなくデータを記録し続けなければならない。従って、長期観測時には、これらのシステムや周囲の環境の状態をリアルタイムに把握することが不可欠となる。

このようなモニター / 診断システムは、大別して次に述べる 3 つの役割を担う。

1. 長期観測時の検出器各システムの状態モニター。

長期観測運転中に、干渉計の状態をリアルタイムで把握し、干渉計やデータ取得系の不具合の発見とそれに応じた調整を行う用途に用いる。

2. 干渉計改良に役立つ情報。

現在、検出器の感度は、目標感度にはまだ到達していない。従って、干渉計の状態を解析・把握して、干渉計の問題点・改良点の特定に役立てる。特に、間欠的または非定期的に発生する雑音源を特定する際に効果的である。

3. 重力波データ解析の基礎的な情報。

重力波解析を行い、重力波が存在した場合に、その検出を疑い無いものとして報告するためには、観測時の検出器の状態を把握しておくことは非常に重要な意味を持つ。

TAMA300 では以上のような役割を満たすために、X-Window 上に表示可能な Quick-Look・干渉計診断・環境信号モニター・観測状態フラッグ・データ取得系モニターを整備した。さらにそれらを補完するために、CCD ビデオ画像のモニター・ δL 信号の音声・FFT アナライザなどが観測中に利用されている。

16.2.1 Quick-Look・干渉計診断・環境信号モニター

干渉計の状態を評価する手法としては、干渉計の主信号の質を評価するもの (HDAQ 信号を利用) と、補助的なデータを用いるもの (HDAQ, MDAQ, EPICS 信号を利用) の 2 つに大別できる。主信号は、重力波信号を含む可能性のある信号である。重力波が無く、検出器が安定に動作している場合には、この信号は定常的でガウス分布に従う雑音として現れるはずである。しかし、実際のデータは各種外乱やレーザー光源の不安定性などの影響で、大きな非定常雑音・非ガウス雑音を含んでいる。従って、この非定常性・非ガウス性は、データの質や検出器の動作状態を評価する重要な基準となる。補助的なデータとは、TAMA の観測中取得された、干渉計の制御信号や、干渉計各部の光強度、地面振動や温度といった各種環境データなど約 160 チャンネルの信号のことである。これらの信号を用いることによって、干渉計の動作が不安定になったり、感度が低下した場合、その原因を知り、干渉計の改良や重力波解析結果に反映させることができる。

干渉計の主信号を用いたものとして、「Quick-Look」と「干渉計診断」の 2 つが用意されている。Quick Look システムは HDAQ システムが正常に動作しているかどうかをチェックし、データの品質をリアルタイムに評価することを目的に作成されたものである。Quick-Look システムでは、8ch ある HDAQ 信号の時系列、ヒストグラム、パワースペクトルにより HDAQ データの基本的な状態を把握し、重力波信号の周波数領域表示 $h(f)$ 、100Hz と 1kHz におけるスペクトラムの履歴、試験的な matched-filter 解析 (単一のテンプレートを使用) の結果により、データの品質とその履歴を把握することができるようになっている。

主信号を用いたもうひとつのシステムが干渉計診断である。TAMA の DT6 時における干渉計診断システムでは、一定時間 (約 1 分) 毎に評価が行われていた。この時間毎に、干渉計出力の特定周波数帯成分 (935Hz まわりの 20Hz 帯域) の校正された平均ノイズレベルと、パワーの 2 乗平均から求められるガウス性が計算され、リアルタイムで表示されていた。

補助信号を用いたものとしては、MDAQ の全チャンネルと EPICS の主要チャンネル (地面振動とレーザーの温度) について、入力電圧 (またはそれを物理量に換算したもの) と、それらの異常時に警告を示すランプをリアルタイムで表示するモニターシステムが用いられた。さらに、腕共振器の透過光強度やコントラクトなど干渉計の状態を把握するのに重要なチャンネルに関しては、時系列表示も行っていた。また、

HDAQ から得られた感度レベルやガウス性、観測状況、MDAQ から得られた光強度や制御信号などの変動は、必要に応じてグラフ化して表示できるようになっていた (図 16.2)。

EPICS システムに入力されている地面振動 RMS 値などの一部の環境信号は、「環境信号モニター」として時系列データが常時表示できる体制になっている。

16.2.2 その他のモニター系

- 観測状態フラッグ:

TAMA300 には観測中を示す「OBS」と呼ばれる信号があり、この信号の状態を表示するモニターが用意されている。この信号が OFF(0V) であるときは干渉計が動作していない、または干渉計の調整中であることを示すことになっている。そのため OBS 信号は HDAQ・MDAQ に入力されており、OBS が OFF になっている間のデータは観測データとしては扱われない。この仕組みが導入された DT5 以降は「総観測データ量」という表現は OBS 信号が ON の時間の合計を示すことになっている。

- データ取得系モニター:

データ取得系の不具合によりデータの取得が停止してしまう事態に備えて、各データ取得系の運転状況を示すモニターが用意されている。このモニターには、記録中のファイル番号やフレーム番号が表示されるようになっており、ログの記録時に参考にするようになっている。

- ビデオ画像:

両腕の透過光、ダークポート・反射ポートなどのスポットの様子は、天文台ネットワーク内のどこからでも Web ブラウザを通じて動画として見る事が可能になっている。このシステムは CCD カメラの出力を 4ch ごとに 2 台のビデオサーバーに入力することで実現されている。

- δL_- 信号の音声:

シフト担当者が詰めるプレハブには、干渉計信号が音声として流されており、干渉計のアンロックや雑音レベルの変化などに直観的に気づくことができるようになっている。このモニターにはネットワーク経由の電子会議システムを利用している。

- ロックインアンプ:

干渉計コンソールには、干渉計の調整を補助するモニターとしてロックインアンプが数台用意されている。干渉計の調整に使用されているものとして具体的には、強度ノイズの δL_- 信号への混入率を示すもの、周波数ノイズの δl_- 信号への混入率を示すもの、アラインメント制御雑音の δL_- 信号への混入率を示すもの、の 3 つが用意されている。

- FFT アナライザ:

干渉計の自動ロックが終了した時点や干渉計調整時には、FFT アナライザを用いて δL_- 信号のスペクトルを観察している。このアナライザには典型的なノイズスペクトルも重ね書きしており、それと現在の感度がどれくらい差があるか把握できるようになっている。この表示により、干渉計担当シフトは干渉計の調整が必要であるかどうか、調整が十分であったかどうかを判断している。

16.3 干渉計調整

干渉計ロックが自動的に終了したとしても、干渉計の感度が最高の状態にあるとは限らない。また、長時間連続運転することにより干渉計の調整が徐々にドリフトし、感度が劣化してしまうことがある。そのため、干渉計担当シフトはモニター系の助けを借りながら数時間に一度干渉計を調整し、可能な限りよい状態に保つ。

調整項目としては、干渉計のアラインメントの調整・自動アラインメントのオフセット調整・アクチュエータバランスの調整・ δL 制御系ゲインの調整・ δl 系のオフセットの調整・ δl 系の復調位相調整などが行われている。

干渉計のロックが失われた時点で、前述の OBS 信号は自動的に OFF になっており、自動ロックによってもこれは ON には復帰しない仕組みになっている。また、シフト担当者は干渉計調整の際には、ボタンにより OBS 信号を OFF にすることが義務づけられている。いずれの場合にも、すべての調整を終了し、スペクトラムアナライザー上で満足な感度が得られたときにのみ、OBS を ON にすることが義務づけられている。

調整機能のいくつかについては自動化が可能であり、今後は完全無人運転へ向けて、自動ロックシステムに自動調整機能を拡張していくのが望ましい。

16.4 観測体制

現時点では観測は無人化されておらず、干渉計・データ取得系の状態を保つためにオペレータが必要である。この意味ではオペレータも観測システムの一部といえよう。

シフトは 3 交代制で 7:00~15:00・15:00~23:00・23:00~7:00 に分けられている。1 シフトに干渉計担当・干渉計アシスタントの 2 名が割り当てられる。シフト担当者はプレハブに待機し、定期的にモニター信号をチェックし、必要に応じて干渉計の調整を行う。また、アンロック・ロック・特筆すべきイベントなどを HDAQ のファイル番号とともにログに記録する。このログにより重力波イベント候補が発見された時刻付近で、干渉計になんらかの異常が無かったかどうかを知ることができる。

トラブルなどによる緊急時には干渉計・データ取得系それぞれのエキスパートに連絡を取り、観測を続ける体制をとっている。