LCGT digital system

システム全体

2010/10/25

宮川、三代木、大石、斎藤(陽)、麻生、和泉

1. はじめに

　LCGT計画の予算化が認められ、その建設に向かって様々なサブグループがその要素技術開発にしのぎを削っている。大型干渉計においては、米国LIGOプロジェクトに代表されるように、複雑な制御をデジタル的に処理し、効率的な感度向上を実現するというのが最近の干渉計開発の流れである。LCGTもこの流れから逃れることはできず、むしろInitial LIGOのような第一世代の大型干渉計に比べ、第二世代以降の技術を使うLCGTにおいては、既存の干渉計よりもさらに複雑なシステムを扱う必要があり、デジタル技術の導入なしでまともに動く干渉計を作ることは、もはや困難であると言わざるを得ない。

　この文書はLCGTにデジタル制御システムを導入するにあたり、Digital systemサブグループの計画を記すことにより、多方面からの建設的な意見を集めるとともに、計画の妥当性、客観性を批判検討してもらうためのものである。

2. 目的

　LIGO等で実績を上げているデジタル制御システム[1,2]をLIGOとの共同開発でLCGTへ導入することにより、スムーズかつ確実な感度向上手段を確立するとともに、感度の安定性の向上を実現し、長時間観測へと対応できる体制を作る。

3．概要

3.1 LIGOとの共同開発

　東京大学宇宙線研究所とLIGOの間でMOU(Memorandum of Understanding)を2009年度に締結した。これはLCGT予算化以前に締結されたものなので、もともとはCLIOとLIGOのDigital system開発での協力を約束するものであったが、その中身は広い意味での日本の重力波グループとLIGOの一般的な協力体制をうたった物である。そのため、現在このMOUを介して、各種Attachmentをつけることで、デジタルシステム以外にも広くLCGTとLIGOとの協力体制を築こうとしている。そういった意味ではデジタルシステムも本MOUのAttachmentの一部となるわけであるが、依然として研究者間の行き来、情報の交流などがあり、協力体制は現在も継続して続いている。

3.2 デジタルシステムの基礎概念

　デジタルシステムは基本的には信号を計算機内に入力するADCと、入力された信号をフィルタリング等で加工する計算機自身、加工された信号を出力するDACからなる。重力波検出器となる干渉計からの入力信号にはPhoto detector等の各種センサーからの光路長制御信号や、角度制御信号等があり、出力信号には振り子に吊られた鏡へのアクチュエータ信号等がある。

　図1はLCGTに導入されるデジタルシステムの概念図を示していて、干渉計の各種センサーからADC、計算機、DAC、アクチューエータと再び干渉計にフィードバックされ、制御のループを作っている。計算機内では量子化ノイズ以外のノイズが原理的に加わらないため、計算機への入出力のところのノイズ混入さえきちんと配慮してやれば、フィードバックの設計がずいぶんと楽になる。計算機への入力には高周波からのAliasを除くためのAnti Alias filterや、出力には低周波からのImageを除くためにAnti Imaging filterを用い、またADCやDACの大きなノイズを回避するためにwhitening filterやdewhitening filterを用いる。これらフィルターは計算機の外に設置するアナログのフィルターである。計算機内ではフィードバックのためのデジタルフィルターを持つことができ、デジタルフィルターは簡単なコマンド等で設定できるようにし、干渉計の複雑な制御に対応する。

　制御ループは今回のシステムの場合16kHz程度でまわし、そこにユーザーがアクセスする方法としては、Frame Builderと呼ばれる16kHzのリアルタイムの速いアクセスと、EPICSと呼ばれる64Hz程度の遅いアクセスがある。Frame builderはデータのストレージも担当し、16kHzのフルデータから1分に一度程度の遅いデータまで、ディスクへの保存と読み込みを可能にする。EpicsやFrame builderにはネットワークを介した複数のクライアント計算機からアクセスが可能で、多人数の同時アクセスをサポートしている。

図1:デジタルシステムを利用した干渉計制御、及びアクセスの概念図

3.1 Digital systemの利点

　デジタルシステム導入による利点は多々あるが、導入が直接感度を向上するという意味ではないということに注意する必要がある。すなわち、導入すればすぐに感度が向上するような魔法の箱ではない。それにも関わらず、現在世界の主力干渉計でデジタル化が行われ、実績を挙げているのは主に以下の利点による。

* 視覚的に分かりやすいヒューマンインターフェースの提供
* よりスムーズなロックアクイジションの提供
* デジタル制御フィルターによる制御デザインのしやすさ
* スクリプト化、速いスイッチング等による、複雑な制御の切り替え時におけるヒュマンエラーの軽減
* レーザーパワー、温度等、長期間モニタの提供

これらは干渉計のような複雑な制御システムで威力を発揮し、より多数の人数が、ローカル、リモートに関わらず、効率よく作業できる環境を提供するからである。デジタル制御システムでは制御ルーチン、スクリプト等、ソフトウェアの出来で性能が決まることが多いため、ソフトウェアの質を高めることが重要なファクターであり、その技術の蓄積にはある程度の時間を要する。LCGTではRSE方式という極めて複雑な制御構成となることが予定されているため、プロトタイプ等を用いてLCGTのテストベンチとして技術を蓄積しておくことが重要である。

3.2欠点

　ここでは公平を期すために欠点も挙げておく。大きく分けて2つの欠点がある。

　一つはスピード。LIGOのデジタルシステムを使う場合実用的なサンプリングレートは16kHz程度である。これは制御ループの帯域に直すと、様々な遅延によるのだが、経験上400Hz程度（UGFが400Hz位までしかとれないということ）である。光路長制御や角度制御、もしくはサスペンションのローカルコントロールなどには十分な帯域であるが、当然のことながら周波数安定化等、広い帯域幅を必要とする制御に用いることはできない。なお、オプションとして限られたチャンネル数であるが、128kHz程度でループをまわす手段もある。

　もう一つの問題点はノイズである。ADC/DACはそれぞれ数uV/rHz程度と、通常簡単に実現できる電子回路のノイズ、数nV/rHzに比べてもかなり大きなノイズを持っている。これらのノイズを回避するためにアナログ回路によるホワイトニング、デホワイトニング等のテクニックが必須となる。また、これもデジタル固有のものだが、入力時には高周波からのエイリアスが、出力時には低周波からの余分なイメージが発生するため、アンチエイリアス、アンチイメージフィルターも必須となる。

　これらの欠点がありながらも例えばLIGOでは極めて小さな変位感度を実現しているので、デジタル制御の欠点はあくまで技術的な問題であり、原理的な問題はあまりないと考えられる。

3.3 応用例

　実際に動いている様子を見なければなかなか理解できる物ではないが、応用例の簡単な説明のみここに挙げておく。これらのほとんどはLIGOや一部CLIOで実装されている物である。

* Lock acquisition code: ロックアクイジションを司る16kHzでまわる速いルーチンと、スクリプト形式の遅いルーチンからなる。各種スイッチ、ブースト、ゲイン等を各ロック状態において、適時変化させる。
* Lock down script: ロックが落ちたときに、すべてのゲイン、位相等のパラメータをロックアクイジション用にリセットするスクリプト。
* Initial alignment script: 干渉計の初期アラインメントを、透過光側においたQPD等を使い、自動で最適化する。
* Beam centering script: 同じくQPD等を使い、ビームを鏡のセンターに自動的に持っていく。
* WFS input matrix calculation scripts for MC and arms: WFSの誤差信号から各自由度へのマトリックスを自動で測定、計算、適用する。
* Noise budget: 自動noise budget生成スクリプト(Matlabベース)。あらかじめ測定しておいた各ノイズ源から重力波信号への伝達関数、及び現在の各ノイズからどのようなノイズが、どれくらい支配的かを表示するプログラム。ターゲットとなりうるノイズ源は、shotnoise、frequency noise、amplitude noise、seismic noise、angle noise、suspension thermal noise、mirror thermal noise、oscillator phase noise、scillator amplitude noise等
* Coil actuator balancing script: コイルドライバーの最適化、Pitch、Yawの分離等
* demodulation phase adjust script for length and WFS: デジタルphser shifterを利用した復調位相の最適化。ただし、2つの復調位相を90度ずらしたI & Q demodulatorが必要となる
* Offset除去 script: PD信号等からのオフセットの除去
* power increaign script: ロック後、レーザーパワーの増加とそれにともなうゲイン変動の補正

4. Digital systemのタスクの範囲

　ここではLCGTのためのDigital system subgroupのタスクとして主に8つ挙げておく。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **No.** | **Function** | **Description, equipments** |
| 1 | Digital control system | Main system. PC, ADC/DAC, AA/AI filter, whitening/dewhitening filter, real time OS, control software, monitor software, data storage. |
| 2 | Detector tuning system | Adjusts interferometer parameters. Tuning software. |
| 3 | Detector diagnosis system | Interferometer self diagnosis. Diagnosis software. |
| 4 | Long term monitor | Monitor software, data storage |
| 5 | Auto lock / auto alignment sequencer | Real time lock code (fast), auto lock and alignment scripts (slow). |
| 6 | Detector operation system for GW observation | Operators, operation scheduling, auto lock scripts. |
| 7 | GW search data calibration | Real time calibration shown in the control room. Projectors, calibration signals, real time calibration software |
| 8 | Real time data analysis | Real time data analysis shown in the control room. Projectors, real time data analysis software |

上から順に大まかに、制御に関すること、診断やモニタ等、オペレーションや観測に関すること、データ取得に関することとなっていて、干渉計の開発から実際の観測まだ多岐に渡る。もちろん、これらの中に各要素技術の制御やモニタ、スイッチング等なども含まれているため、デジタルシステムは干渉計のありとあらゆるところに関わってくる。

　データ解析に関してはリアルタイム解析と生データのストレージまでを範囲とし、それ以降のオフライン解析はデータ解析グループにまかせる。リアルタイム解析はデータ解析グループとの共同作業となる。

5. Requirement

　LCGTを建設するにあたり、干渉計としてきちんと動作し、重力波の観測まで含めた十分な性能を有するための、デジタルシステムに関わる要求値を表にまとめておく。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Item** | **Requirements** | **Comment** |
| Sampling rate | >16kHz |  |
| Dynamic range of input | >+/-15V | Half on differential input |
| Dynamic range of output | >+/-10V | Half on differential output |
| ADC noise | <3uV/rHz | Can be reduced by whitening filter |
| DAC noise | <3uV/rHz | Can be reduced by dewhitening filter |
| time delay | <100usec | To realize >200Hz UGF |
| Input channel numbers | >2048ch | (16kHz:>128ch, 2kzHz:>512ch, 64Hz>1024ch) |
| Output channel numbers | >512ch | for mirrors, seismic attenuators, PZTs |
| Stored channel | 16kHz:>64ch, 2kzHz:>512ch, 64Hz:>1024ch, 16Hz:>10000ch | ~300TB/year |

6. 仕様

　基本はリアルタイムOSを積んだ計算機にADCとDAC、Binary I/Oを積んだものに、必要なソフトを載せたものである。また、上で書いたホワイトニング等のアナログ回路も必須である。具体的には以下の通りである。

6.1 Hardware

Real time system:

* PC: 複数プロセッサ、複数コア
* OS: Linux with real time core
* PCIe expansion chassis
* Analog Digital Converter (ADC)
* Digital Analog Converter (DAC)
* Binary Output (BO)
* Timing system
* 付随するアナログ回路:
  + Interface box for ADC/DAC/BO
  + Anti Aliasing/Imaging filters
  + Whitening/dewhitening filter + Variable gain amplifier

モニター、及び操作用PC:

* Desktop PC or lap top PC with Linux

6.2 Software

* Matlab and Sumulink: real time code generator
* CDS software
  + RTFE: リアルタイムコード
  + DAQS: データ取得サービス
  + EPICS: channel name 等の割当
  + MEDM: EPICSを利用したヒューマンインターフェース
  + AWG: Arbitrary Wave form Generator
  + DTT: Diagnostic Test Tool, FFT, Sine response, Swept sine, Trigger time response等
  + foton: digital filter生成ツール
  + dataviewer: 多チャンネル、簡易オシロスコープ
  + striptool: 長時間モニターツール
  + ezca: スクリプト用自動制御コマンド群、ezcaread, ezcawrite, ezcastep, ezcaservo, ezcademod等
  + tds: 自動制御コマンド群
  + burt: 干渉計パラメータ記録、再現ツール
  + conlog: 時系列での干渉計操作記録データベース

6.3 Network

　計算機とPCIe expansion chassisの間はSHBという規格で接続される。10m程度までの短い距離はメタルケーブルで接続されるが、それ以上の長さは間にPCIe switchを含んだ光ファイバーで接続される。このファイバーの長さは300mまでの長さがサポートされる。PCIe switchには複数のPCIe expansion chassisが接続され、また、PCIe switchを含んだ複数の計算機がReflective memory[3]と呼ばれる機器を介して接続される予定である。Reflective memoryを用いることにより、他の遠隔の計算機の一部データがリアルタイムでローカルなメモリにあるように見える。センタールームに計算機数台、expansion chassis5台程度、両エンドルームに計算機とexpansion chassisを各一台づつ程度置く予定である。センタールームとエンドルームの3kmの接続も、Reflective memoryを使う予定である。

　次に、デジタルシステムと実験装置の接続について述べる。デジタル装置の出力は基本的にD-sub 9pinコネクターの形で提供され、その中の8本を差動で使うために1コネクター当たり4つの信号が扱えることになる。D-subケーブル内の信号は差動信号であるため、数10m程度までは延ばすことができる。数10mを超える接続はexpansion chassisをファイバーで接続することで対応する。

　D-subコネクタから実験装置に接続するためのドライバーの製作は基本的に各サブグループの担当としてもらう。一つの箱に、D-subの端子と、実験装置を結ぶ回路を組み込む等する。差動信号を受け取り、シングルエンドに変換するための回路図などは、デジタルグループから回路サブグループを通して提供する。また、ゲインを調整するためのアンプや、whitning/dewhitening filterは汎用の物を用意する予定であるが、ドライバーの中に組み込みたという要請も考えられるために、その場合はデジタルグループが回路図を提供し、各グループで組み込んでもらう。

6.4 Channel list for stored data

a. 16kHz (total 64ch)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Part** | **Channel point** | **Channel number** | **Description** |
| Laser | Output laser power[W] | 1 |  |
|  | IFO Input laser power[W] | 1 |  |
| MC | REFL | 1 |  |
|  | MC length feedback | 1 |  |
|  | MC frequency feedback | 1 |  |
|  |  |  |  |
| LSC | I&Q dor DARM, CARM, MICH, PRC, SRC, etc. | 10 |  |
|  | error, feedback | 10 |  |
| SUS | length \* 10 suspensions | 10 |  |
|  |  |  |  |

b. 2kHz (total 512ch)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Part** | **Channel point** | **Channel number** | **Description** |
| ASC | WFS | 5x4quad x (RF+DC)~50 |  |
|  | Oplev | 14x4quad x ~60 |  |
| SAS | ETMXY, ITMXY, BS, PR12M, SR12M, MC1-3, | 32x14~400 |  |

c. 64Hz Long term monitor (total 1024ch)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Part** | **Channel point** | **Channel number** | **Description** |
| Laser | crystal temperature[degree] and etc. | 10 |  |
|  | Master laser power[W] | 2 |  |
|  | Output laser power[W] | 2 |  |
|  | IFO Input laser power[W] | 2 |  |
| Seismic | Room, outside, 3-axis | 30 |  |
| Sound | Room, outside, table | 10 |  |

d. 16Hz Long term monitor and Epics channel data (total ~10000ch)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Part** | **Channel point** | **Channel number** | **Description** |
| Temperature[deg] | room | 10 | center, end, arm |
|  | table | 10 | laser, REFL, AS, pickoff, end |
|  | cryostate | 150\*4=600 | Low temperature |
| Humidity[%] | rooms | 10 | center, end, arm |
| Dust | rooms | 10 | center, end, arm |

6.5 Saved Parameters

　Epics上のパラメータは全て記録され続けていて、conlogと呼ばれるソフトで閲覧、呼び出し、記録等がサポートされる。記録されるパラメータ例を以下に挙げておく。

Gain, switch, offset, filter bank, filter on/off, matrix components and all other parameters on Epics channne

6.5 Interface information to other subgroups

　ICDで現在までに定義されている各サブグループへのインターフェースを表に挙げておく。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **Item** | **Related sub-system** | **Requirements** |
| \* | Sampling rate | Data acquisition, Data analysis, IFO control | 16384Hz(sampeled at 65536Hz and decimated to 16384Hz)  option:up to 65536Hz for limited number of channels |
|  | Number of stored channels | Data acquisition, Data analysis, IFO control | 16kHz:64ch, 2kHz:512ch, 64Hz:1024ch  16Hz:16384 epics channels  (see channel list) |
| \* | Data bit resolution | Data acquisition | 32bit = 4 Byte integer |
|  | Data transfer rate | Data acquisition | 4MB/sec for 16kHz,  4MB/sec for 2kHz,  128kB/sec for 64Hz,  1MB/sec for 16Hz,  Total ~10MB/sec  ~30GB/hour  ~1TB/day  ~300TB/year |
|  | Saved parameters (using conlog) | Data analysis, IFO control | See parameter list |
| \* | ADC dynamic range | IFO control | Full differential +/-10V = effective range +/-20V |
| \* | DAC dynamic range | IFO control | Full differential +/-5V = effective range +/-10V |
| \* | through delay | IFO control | 80usec |
| \* | ADC noise level | IFO control | 2uV/rHz |
| \* | DAC noise level | IFO control | 1.5uV/rHz |
| \* | AA filter noise level | IFO control | 0.1u V/rHz |
| \* | AI filter noise level | IFO control | 0.1u V/rHz |
| \* | whitening filter noise level | IFO control | 1n V/rHz |
| \* | dewhitening filter noise level | IFO control | 1n V/rHz |
| \* | whitening filter input impedance | IFO control | TBD |
| \* | dewhitening filter output impedance | IFO control | TBD |
|  | Connector shape | IFO control | D-SUB9 @ ADC in, DAC out, BO, AA in, AI out |
| \* | Power consumption | Infrastructure | For iLCGT:  PC and cuircuits 30kW  Data storage 25kW  Client PC 10kW  Ohters 1kW  Total 66kW  For bLCGT  TBD |
| \* | Waste heat and cooling | Infrastructure | TBD |
|  | Network capability | Infrastructure | 10Gbps Ether Net |
| \* | Optical fiber cable capability for real time PC, clock timing system | Infrastructure | TBD |
|  | GPS antenna | Infrastructure, Data acquisition | TBD |
|  | Location and space | Infrastructure, Data acquisition, IFO control | 5 racks at center room, 1 rack at X end room, 1 rack at Y end room for control system  10 racks at data center |
| \* | Remote control switch | Vacuum, Infrasturucture | TTL(0V-5V) |
|  | Wireless LAN (digital system on laptop PC) | Infrastructure | IEEE802.11n(300Mbps) |
|  |  |  |  |

7. デジタルシステムの導入

　LCGTへのDigital systemの導入は主に

1. CLIOでのプロトタイプ試験

2. 各要素技術での導入

3. LCGT本体への導入

の3段階に分けて行われる。

7.1 CLIOでの試験

　CLIOは現在日本でもっとも感度の優れたプロトタイプ重力波検出器であるが、実際にCLIOにdigital systemを小さいスケールながらも導入し、その動作確認と基本性能を検証する[4]。すでに干渉計の制御に成功し、デジタルシステム固有のノイズがCLIOの感度を制限しないことが確認されている[5,6]。

7.2 サブグループへの配布

　LCGTの予算化が認められ、LCGTサイトへの実際のデジタルシステムのインストールまでに、デジタルシステムを組み込んでの要素技術開発を必要とする各サブグループに対し、デジタルシステムサブグループからCLIOに組み込んだ物と同等のシステムを提供する。初年度の予算規模にもよるが、5台程度、すなわち5サブグループ程度への配布を考えている。各サブグループで構築されたシステムは、LCGT本体のデジタルシステムの一部としてそのまま導入される。

　なお、干渉計部分は引き続きCLIOを用いて開発を継続する。また、解析手法等の開発もCLIOのデータを用いて行う。

7.3 LCGT本体

CLIOもしくは各サブグループで開発されたシステムをもとに、LCGT本体へ組み込んでいくが、LCGT本体では複数台の計算機がセンタールームとエンドルームに存在する巨大なシステムになる。センターとエンドルームは3kmの光ファイバーケーブルでReflective Memoryを通じて接続することになる。また、チャンネル数が1024以上と圧倒的に多いため、

実際の手順では、最初にレーザー、周波数安定化等のスイッチやモニタシステムを構築する。この段階ではデジタルでループを組んで制御するものはない。次にMC、X-armの防振装置及び鏡のローカル制御の構築となりここで初めて制御が出てくる。ただしこれはまだ帯域幅10Hz程度の遅い制御である。その後順次MCロック、X-armロックと速い制御になり、最終的にY-arm まで含めたFPMI方式でを整備することになる。初期LCGTはここまでで、基本的なデジタルシステムはこの段階までに全てインストールされる。その後各種モニタ等のチャンネル数を増やしつつ、低温まで含めたRSE方式への最終段階のLCGTへと拡張していく。

　また、初期LCGTの段階では500TByte程度のデータストレージを坑内に設置すること考えていて、これは1年程度のデータを保存するストレージ量に相当する。最終的には300Peta Byte(1Peta=1000T)程度のデータストレージが必要と見込まれており、これは坑外の研究棟等に設置される予定である。500TByte程度のストレージはデジタルシステムの予算から構築することが可能であるが、最終的なPbyteクラスのストレージはデータ解析グループとも相談の上、予算の出所、設置場所等を検討する必要がある。

7.4 解決すべき問題点

　まだLCGT導入までに解決しなければならない技術的問題点もいくつか存在する。できる限りのテストはCLIO等を用いて実機に近い形で行うが、以下に掲げた物はLCGT本体でのテストが必要であると考えられる。

* 3km先に飛ばす技術の開発(Reflective memory[3]を使う予定)
* 多数のチャンネルに対応できるか (2048ch程度を想定)
* 大規模データストレージシステム(3Peta Byte/10Year)

3kmのテストはあらかじめ短いファイバーを使ってのテストを重ね、最終的に長距離で時間遅延等が規定内に収まるかどうかを見なければならない。

また、LCGT本体が建設されて実際に動き出すまでにまだ何年かあり、それまでに本デジタルシステムもバージョンアップなどで、仕様の変更を余儀なくされる場合があるであろうが、そのような場合にも対応できるような体制を整えておくことも必要である。

参考文献

[1] AdvLigo CDS Realtime Software SysAdmin Guide, [LIGO-T080136](https://dcc.ligo.org/cgi-bin/DocDB/ShowDocument?docid=1032)

[2] AdvLigo CDS Realtime Code Generator (RCG) Application Developer’s Guide, [LIGO-T080135](https://dcc.ligo.org/cgi-bin/private/DocDB/ShowDocument?docid=1033)

[3] <http://www.ge-ip.com/products/family/reflective-memory-hubs>

[4] <http://gw.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/CLIO/Tasks/DigitalControl>

[5] Digital systemの現状, [JGW-G1000076](http://gw.icrr.u-tokyo.ac.jp/cgi-bin/DocDB/ShowDocument?docid=76)

[6] 低温レーザー干渉計CLIO(30)デジタル制御IV, [JGW-G1000172](http://gw.icrr.u-tokyo.ac.jp/cgi-bin/DocDB/ShowDocument?docid=172)