LCGT 制御基本設計
（LSCとASCを中心に）

佐藤修一

LCGT-RSE制御系開発

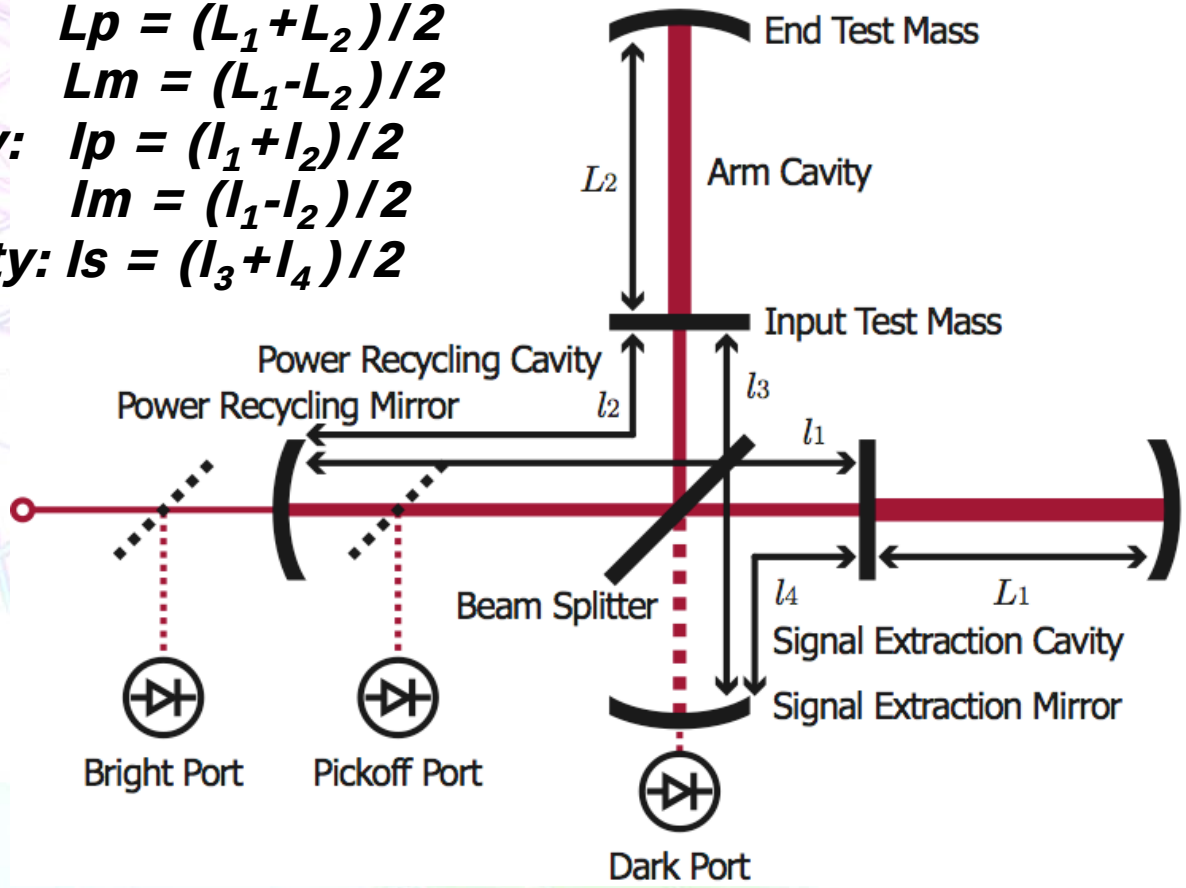
- 干渉計制御系の開発
- 全50以上の制御ループ @TAMA300
  - *LSC：長さ制御*
    - *ロックアクイジション*
    - *DCリードアウト*
  - *ASC：アラインメント制御*
  - *レーザー強度安定化*
  - *周波数安定化*
  - *ローカル制御*
  - *ビームオリエンテーション制御*
  - *ビームセンタリング制御*
  - *ドリフト制御*
  - *…*
- これらを統合的に設計し、干渉計として動作するものをつくる
- 本WGではこれらの中から優先度の高いものを選択的に検討する

RSE干渉計の概要

- **Additional mirror (SEM) at dark port**
  - ***LCGT: (exact) broadband RSE***

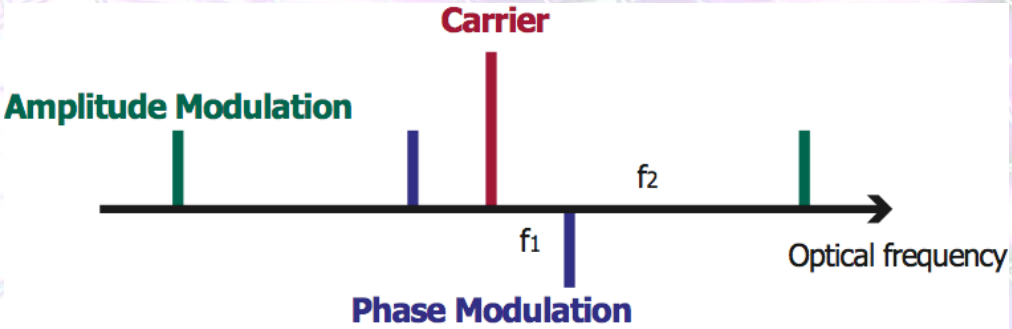
- **Length degrees of freedom**
  - ***Common-arm:*** $Lp = (L_1+L_2)/2$
  - ***Differential-arm:*** $Lm = (L_1-L_2)/2$
  - ***Power-recycling cavity:*** $lp = (l_1+l_2)/2$
  - ***Michelson :*** $lm = (l_1-l_2)/2$
  - ***Signal-extraction cavity:*** $ls = (l_3+l_4)/2$

- **Signal ports**
  - ***Bright (reflection)***
  - ***Pickoff***
  - ***Dark (GW-readout)***



LSCベースライン

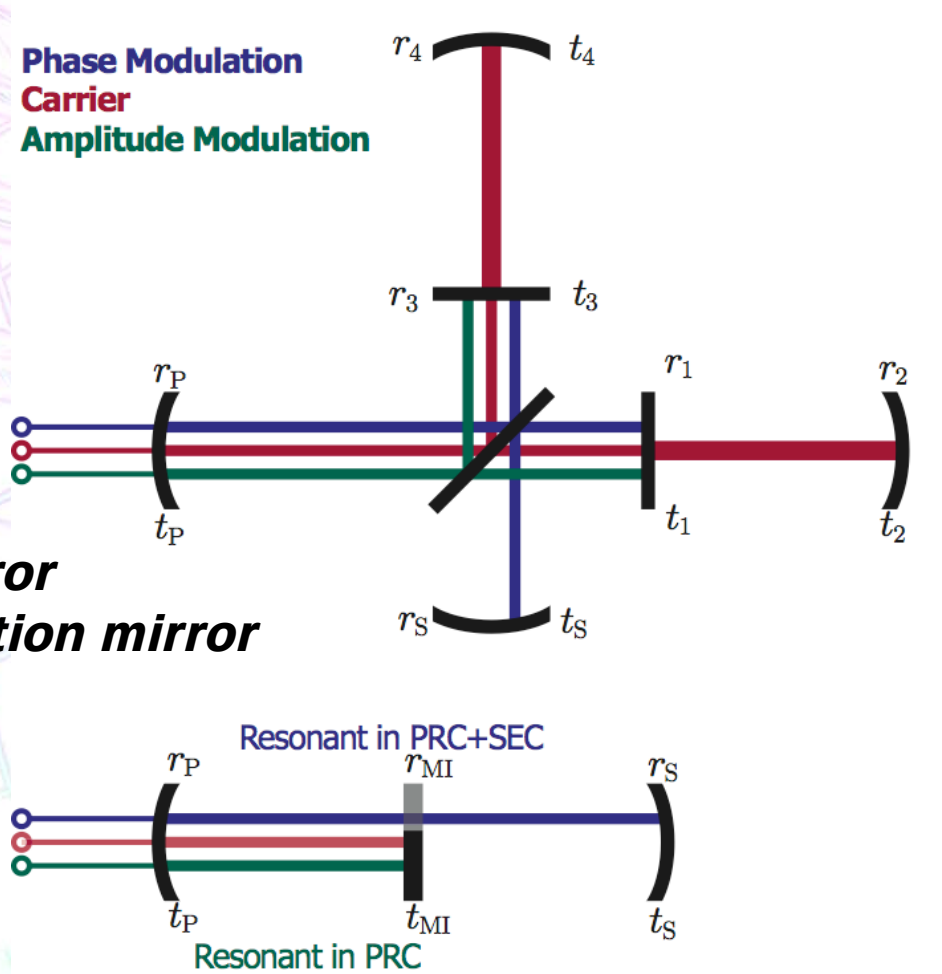
- **Readout scheme**
  - *RF readout*
  - *DC readout (still in review)*
- **Modulation scheme**
  - *Double modulation (producing balanced sidebands)*
  - *Double demodulation*
  - *Parallel EOM modulation (to avoid sub-sidebands)*
- **Modulation arrangement**
  - *Carrier*
  - *Phase modulation*
  - *Amplitude modulation*



- **Signal extraction**
  - *Arm control signals from CR x PM*
  - *Signals for central part of RSE from PM x AM*

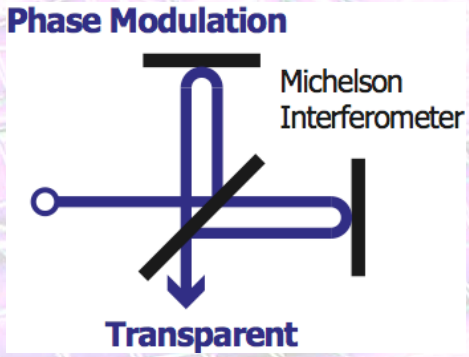
変調の設計（1）

- **Carrier**
  - ***Circulates inside arms and PRC***
- **Phase modulation (f_1)**
  - ***circulates inside PRC+SEC***
- **Amplitude modulation (f_2)**
  - ***circulates inside PRC***
- **No longer coupled cavity**
  - ***For both modulation side bands***
  - ***PM: Michelson as a steering mirror***
  - ***AM: Michelson as an ideal reflection mirror***



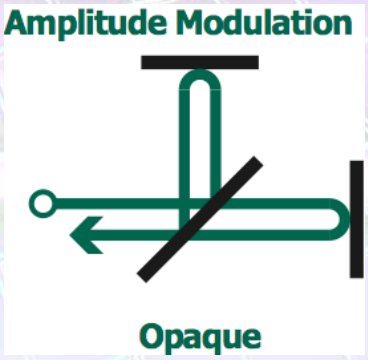
変調の設計（2）

- **Michelson interferometer (MI) is a kind of “mirror”**
  - **r_{MI}, t_{MI} are functions of l_{sch} and Ω_m**
    - $r_{MI} = \cos(l_{sch}\,\Omega_m/c)$
    - $t_{MI} = i\,\sin(l_{sch}\,\Omega_m/c)$



- **Point 1**
  - **MI is transparent to PM**
    - $r_{MIPM} = \cos(l_{sch}\,\Omega_{PM}/c) = 0,\ \ l_{sch}\,\Omega_{PM}/c = 0+n\pi$

- **Point 2**
  - **MI is opaque to AM**
    - $r_{MIAM} = \cos(l_{sch}\,\Omega_{AM}/c) = 1,\ \ l_{sch}\,\Omega_{AM}/c = \pi/2+m\pi$



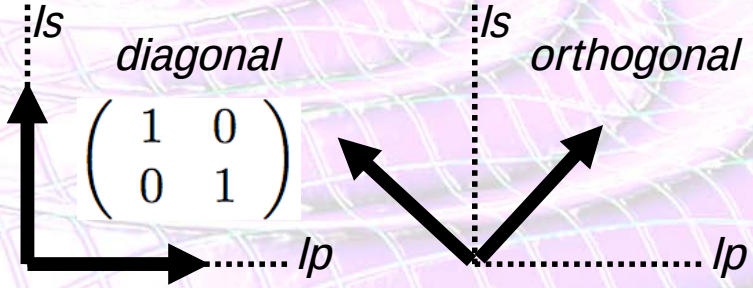
- **Example:**
  - $l_{sch} = 7.5\ m$
  - $\Omega_{PM} = 10\ MHz$
  - $\Omega_{AM} = 60\ MHz$ ($2\Omega_{PM} = 20MHz$, $4\Omega_{PM} = 40MHz$ does not work)

センシングマトリクス

- **L-signals**
  - ***From CR x PM***
  - ***Almost diagonal due to carrier enhancement in arms***

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

- **I-signals (central part of RSE)**
  - ***From PM x AM***
  - ***Orthogonal (instead of diagonal)***



$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- **LCGT base line**

Black: Analytic results

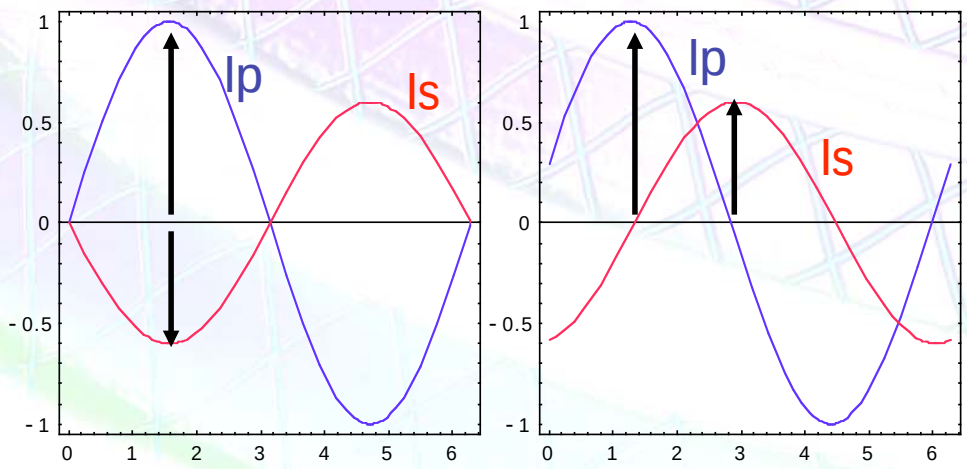
Red: Numerical simulation using "FINESSE"

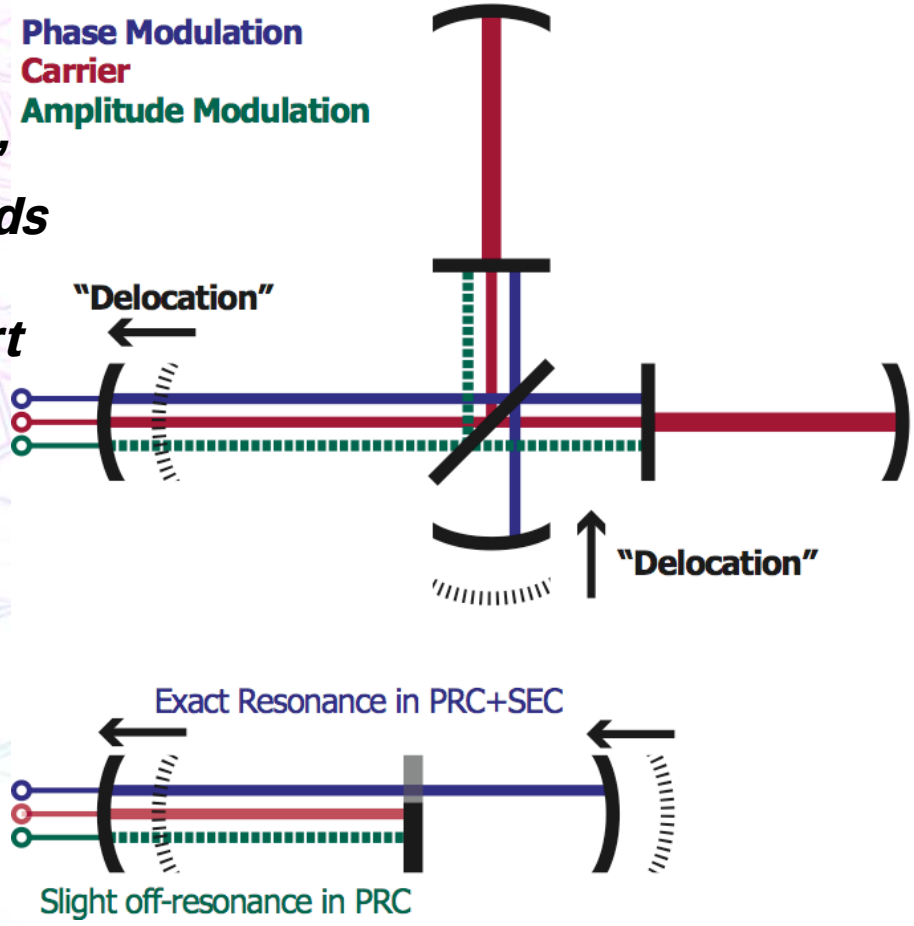
	DM	Phase		Degrees of freedom				
Port		*RF1*	*RF2*	*Lp*	*Lm*	*lp*	*lm*	*ls*
Bright	CRPM	0	-	**1** *1*	0 *0*	0.0036 *0.0026*	0 *0*	0.0026 *0.0013*
Dark	CRPM	90	-	0 *0*	**1** *1*	0 *0*	0.001 *0.00125*	0 *0*
Bright	AMPM	0	0	0.0017 *0.0021*	0 *0*	**1** *1*	0 *0.0006*	0.73 *0.51*
Dark	AMPM	90	0	0 *0*	0.001 *0.00238*	0 *0*	**1** *1*	0 *0*
Pickoff	AMPM	0	0	-0.00032 *-0.0019*	0 *0*	-1.3 *-1.65*	0 *-0.0012*	**1** *1*

LSCオプション："Delocation"

- **Same modulation arrangements**
  - **PM:** ***circulates inside PRC+SEC***
  - **AM:** ***circulates inside PRC***

- **The idea**
  - ***Make use of slight "off-resonance"***
    → Causes rotation of sideband fields
  - ***Different demodulation phases***
  - ***Two diagonal signals from one port***





LCGT-RSE開発の概要

- **Almost diagonal!**
  - **Perfect separation for lp and ls (in principle)**

- **Some effect on**
  - **Signal strength**
  - **Off-diagonals**

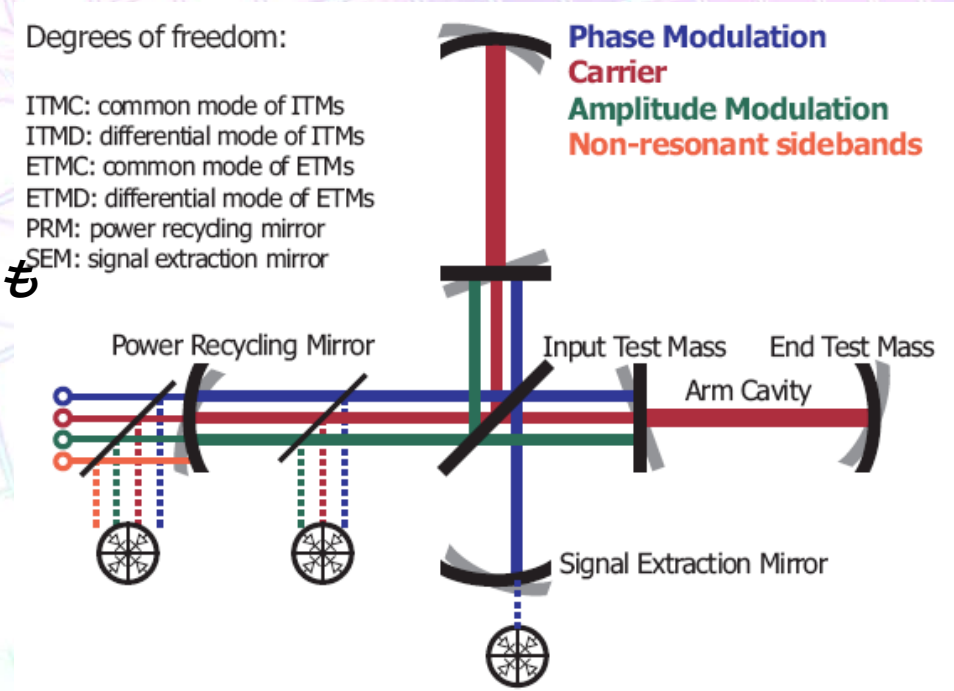
Black: Analytic results
Red: Numerical simulation using "FINESSE"

	DM	Phase		Degrees of freedom				
Port		*RF1*	*RF2*	*Lp*	*Lm*	*lp*	*lm*	*ls*
Bright	CRPM	-1.3	-	**1** *0* *1*	0 *0*	0.00356 *-0.0026*	0 *-0.000062*	0.00256 *-0.0013*
Dark	CRPM	90	-	0 *0*	**1** *0* *1*	0 *0*	0.001 *0.0013*	0 *0*
Bright	AMPM	-1.3	14.4	0.001 *-0.0017*	0 *0*	**1** *0* *1*	0 *0*	0 *0*
Dark	AMPM	90	-14.4	0 *0*	0.001 *-0.0017*	0 *0*	**1** *0* *1*	0 *0*
Pickoff	AMPM	-1.3	42.4	0.001 *0.00088*	-0.001 *0*	0 *0*	0 *0*	**1** *0* *1*

アラインメント制御の開発

- アラインメント制御
  - *干渉計の長期・短期安定性のためには、もはや必須アイテム*
  - *にもかかわらず、デザイン通り動いている干渉計は極めて数少ない*
    →相応の理由があるはず
  - *問題の可能性はいろいろ指摘されつつある*
    - 共振器の縮退問題
    - サイドバンドの幾何学的不安定性
    - 熱レンズの効果
    - etc...

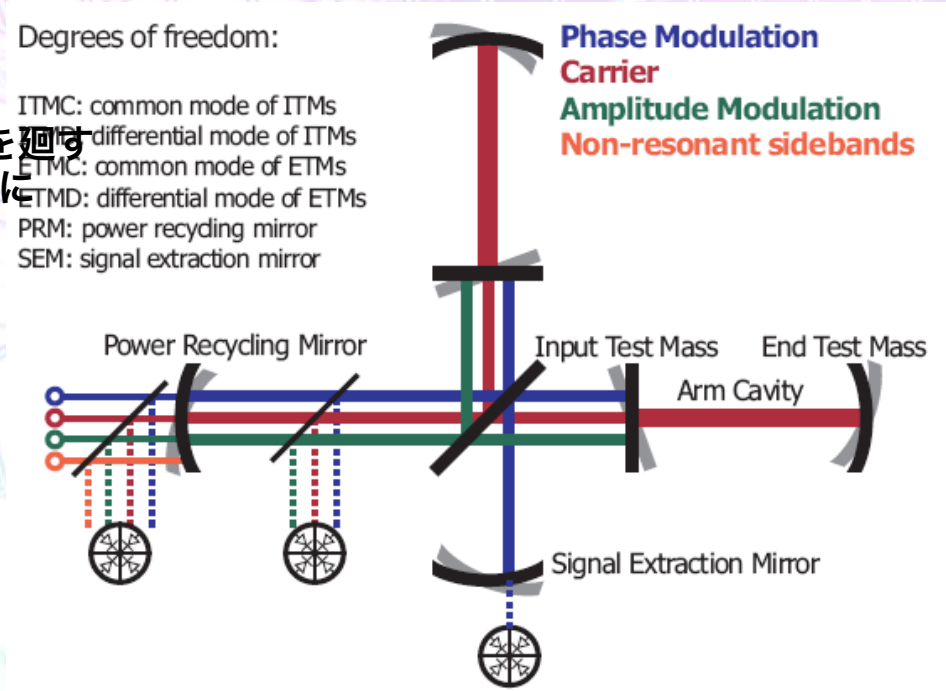
- アラインメント制御の開発
  - *東大での実験以降まとまった研究がない*
    →特にRSEに関して
  - ***LCGT向けの「詳細設計」にあたり***
  - *他プロジェクトで露見しつつある問題をも*
    取り込むよい機会



アラインメント信号取得法（提案項目）

- 変調・復調方法、信号取得ポート
  - *二周波変調（位相変調＋強度変調）、現在のLCGTデザイン*
  - *＋非共振サイドバンド*
  - *通常の信号取得ポートを想定*

- リサイクリング共振器の縮退問題
  - *縮退がある状態*
    - 独立な信号を得ることが困難
    - サイドバンドの幾何学的不安定性
  - *縮退を解く*
    - ITM-ARに曲率をつけ、レンズ状に
      →リサイクリング共振器内でGouy位相を廻す
    - MMT相当の機能をリサイクリング共振器に
      →折りたたみリサイクリング共振器
      （aLIGOの公式デザイン）
  - *検討項目*
    - 鏡（曲率）は製作できるか？
      →EMが可能なら原理的には可能か？
    - 雑音評価、制御安定性、等
    - etc...



アラインメント信号取得法（提案項目）

対角化済
対角化可能
対角化難

- 信号分離

縮退なし

Port	Demod.	$ITMD$	$ETMD$	$ITMC$	$ETMC$	PRM	SEM
Bright	PM-AM	1	-2×10^{-3}	3×10^{-4}	-5×10^{-7}	2×10^{-3}	-1×10^{-5}
Dark	CR-PM	0.6	1	-5×10^{-5}	-1×10^{-2}	6×10^{-2}	0
Bright	AM-NR	-9×10^{-3}	1×10^{-5}	1	-2×10^{-3}	0	0
Pickoff	CR-NR	1×10^{-4}	3×10^{-4}	0	1	2	0
Bright	AM-NR	5×10^{-5}	6×10^{-7}	0	1×10^{-5}	1	0
Pickoff	PM-AM	2×10^{-4}	4×10^{-7}	0	6×10^{-6}	0.9	1

縮退あり

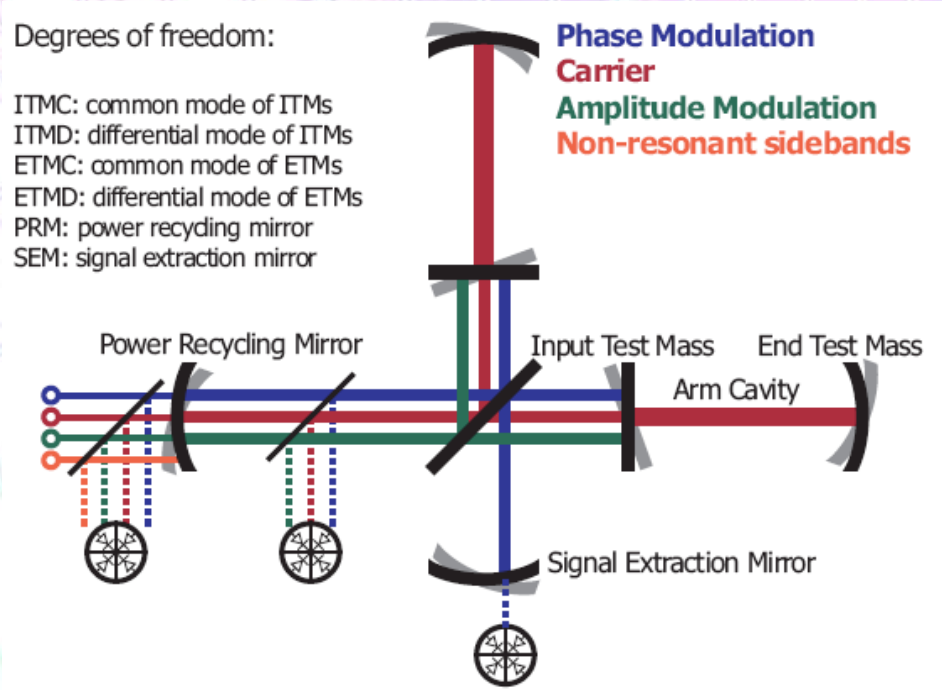
Bright	*PM-AM*	*1*	-2×10^{-4}	-2×10^{-3}	4×10^{-6}	2×10^{-4}	5×10^{-4}
Dark	*CR-PM*	0.6	*1*	5×10^{-5}	3×10^{-5}	-1×10^{-4}	*0*
Bright	*PM-AM*	4×10^{-5}	-7×10^{-8}	*1*	-2×10^{-3}	−0.6	−0.4
Bright	*CR-NR*	-3×10^{-3}	-8×10^{-3}	0.6	*1*	-2×10^{-2}	*0*
Bright	*CR-AM*	-2×10^{-4}	*0*	−1	2×10^{-4}	*1*	*0*
Bright	*CR-PM*	-7×10^{-4}	-9×10^{-4}	−2	1×10^{-2}	1	*1*

- *縮退がない場合はどうにか対角化できそう*
  →素性のよいアライメント信号が取れそう

アラインメント制御設計作業（案）

- アラインメント制御設計書作成
  - *「基本設計書」から「詳細設計書」相当の内容*
    - 設計（評価）指針
    - 検討項目
      →基本、原理、現実、現場項目等、階層化
    - LCGTアラインメント制御設計
    - 各プロジェクトで問題化している案件も解決策とともに盛り込む

- プロトタイプ実験計画（案）
  - *原理検証実験@法政*
    - 縮退を解くことによる信号分離
    - テーブルトップ結合共振器
  - ***RSE実証実験@TAMA***
    - RSEフル干渉計での制御実証実験
    - 全自由度制御による制御系評価



設計作業の現状

- LSC長さ制御
  - *「LCGT設計仕様書」*
  - *「基本設計書」相当の内容*
  - *「詳細設計書」相当の内容へ改訂*
    - 雑音評価
    - ロックアクイジション
    - リードアウト方式の検討
    - その他懸案事項の検討

- ASC角度制御
  - *「姿勢制御設計（草書）」：書きかけ*
  - *「基本/詳細設計書」相当の内容を*
    - 設計（評価）指針
    - 検討項目
      →基本、原理、現実、現場項目等、階
    - LCGTアラインメント制御設計
    - 各プロジェクトで問題化している案件も

LCGT の長さ制御の設計仕様

干渉計制御法ワーキンググループ

平成 17 年 9 月 1 日

1　はじめに

LCGT では、両腕に Fabry-Perot 共振器を備えたマイケルソン型干渉計に、Power Recycling および Resonant Sideband Extraction を加えた、いわゆる RSE 干渉計方式を採用する。Signal Extraction Cavity における電場の共振状態を選ぶことにより、重力波検出器として異なる稼働モード[1]が実現できるが、LCGT では広帯域モードでの運用が決定しているので、その制御法について基本設計仕様を示す。

本編では、LCGT の基本設計として決定された仕様について、要求項目および仕様の骨子を要約するとともに、ひき続く節でその詳細について述べる。制御方法の設計思想・指針と、これまでの議論の中で候補として挙がった仕様についての紹介、およびそれらの比較、詳細な議論の内容、議論の経過等については、仕様決定の記録・今後の参考資料としてのために、補遺として付録する。

レーザー干渉計の姿勢制御設計（草書）

1　この文書の目的

RSE 干渉計の鏡姿勢の制御について、世界基準の評価に耐える設計をするための準備書という位置づけ。

2　設計指針

RSE 干渉計の鏡姿勢の制御の設計にあたり、指針となるべき項目を挙げる。

2.1　干渉計感度へのインパクト

2.1.1　ミスアラインメントの（散射および制限）雑音感度への寄与

鏡のミスアラインメントによる基本モードから高次モードへの散乱を原因とする信号の減少および雑音の増加の効果を検討する。ナイーブには、ミスアラインメントによって共振器内の光量が減り信号が減少する効果とダークポートに漏れてくるジャンク光が増加して散射雑音レベルが悪化する効果を想定する。