

雑誌会

H25前期雑誌会
5/22 市川



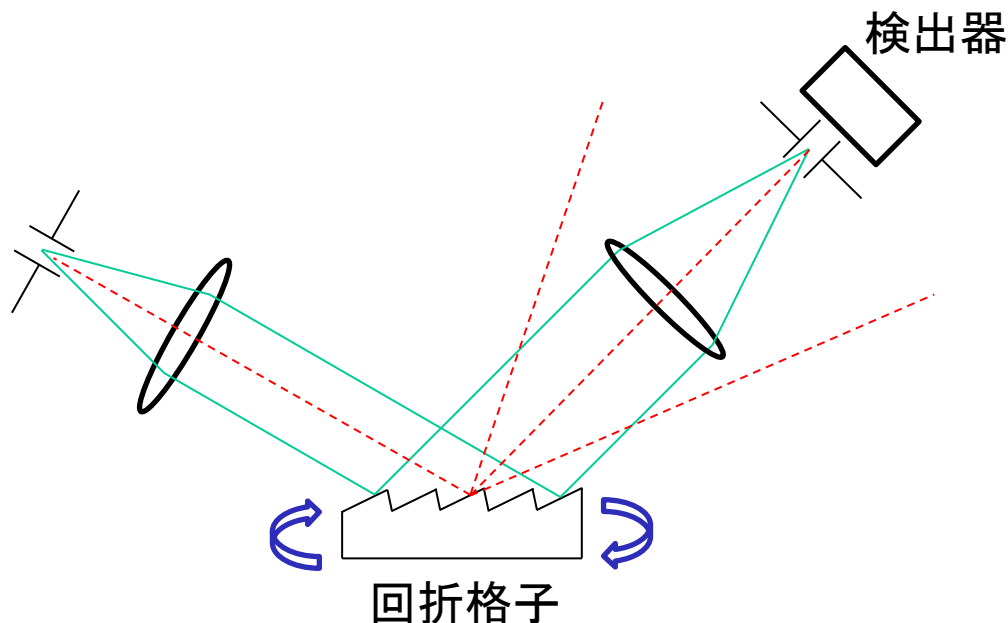
回折格子を用いた分散型赤外分光法

$$\sin\alpha + \sin\beta = m\lambda p \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

特定の波長のみを検出



回折格子を回転させ
波長掃引を行う



- 回折格子の溝数により分解能が決まる
- 異なる次数の回折光をカットする必要がある
- 波長掃引を行うため、信号の利用効率が悪く、干渉波形は暗い



フーリエ変換赤外分光法

フーリエ変換分光法 (FT-IR)

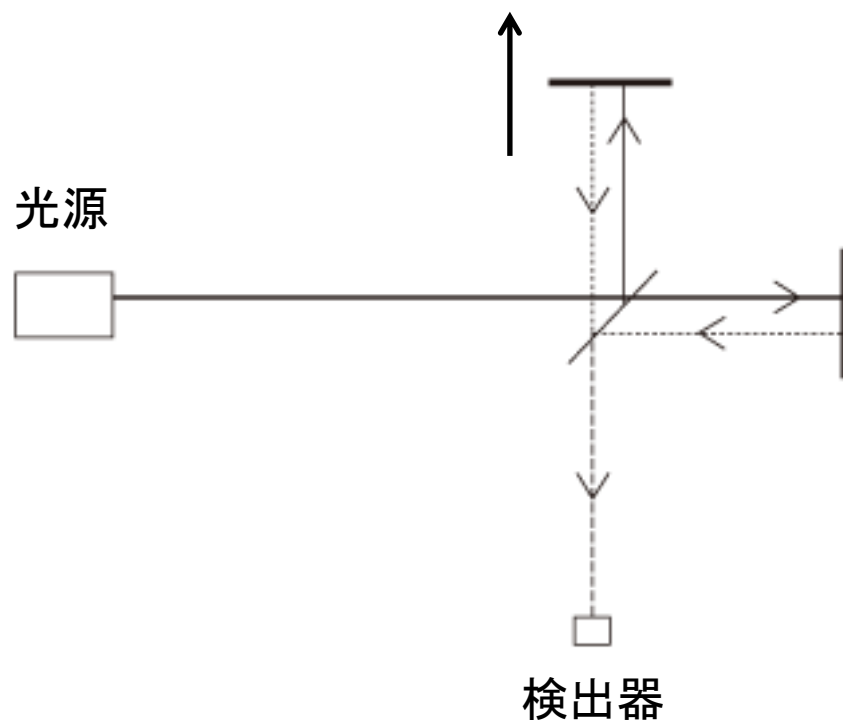
ミラーを光軸に対して平行に動かしていき、空間軸の関数として干渉波形を得る。

干渉波形



フーリエ変換

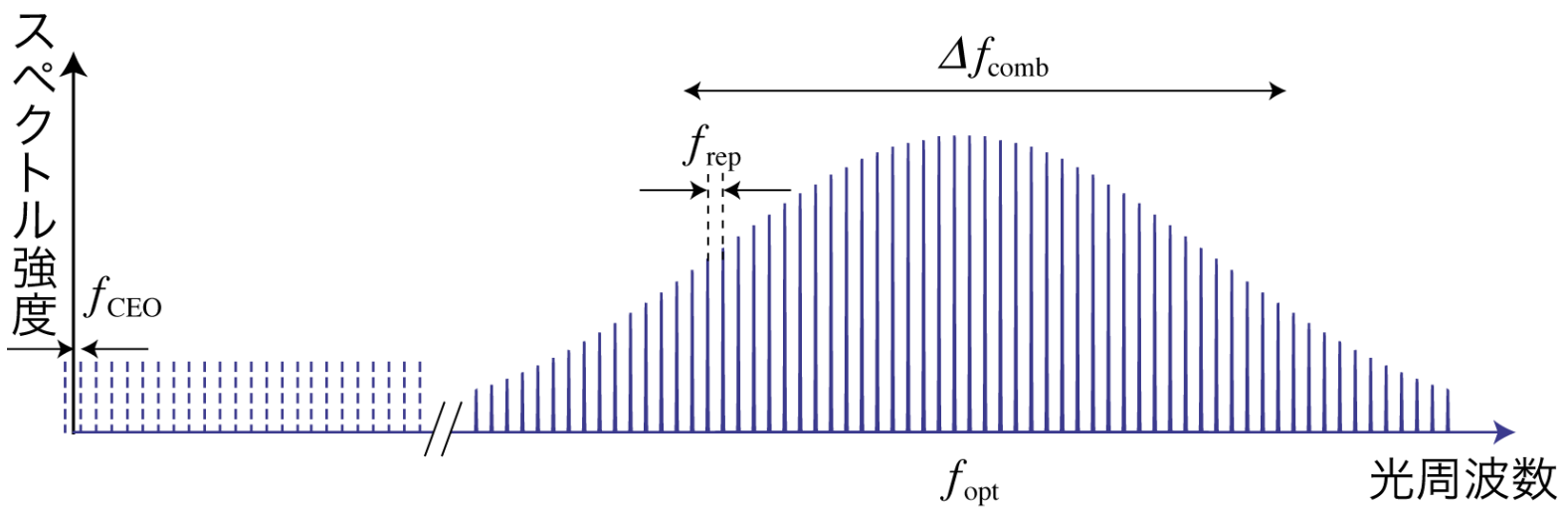
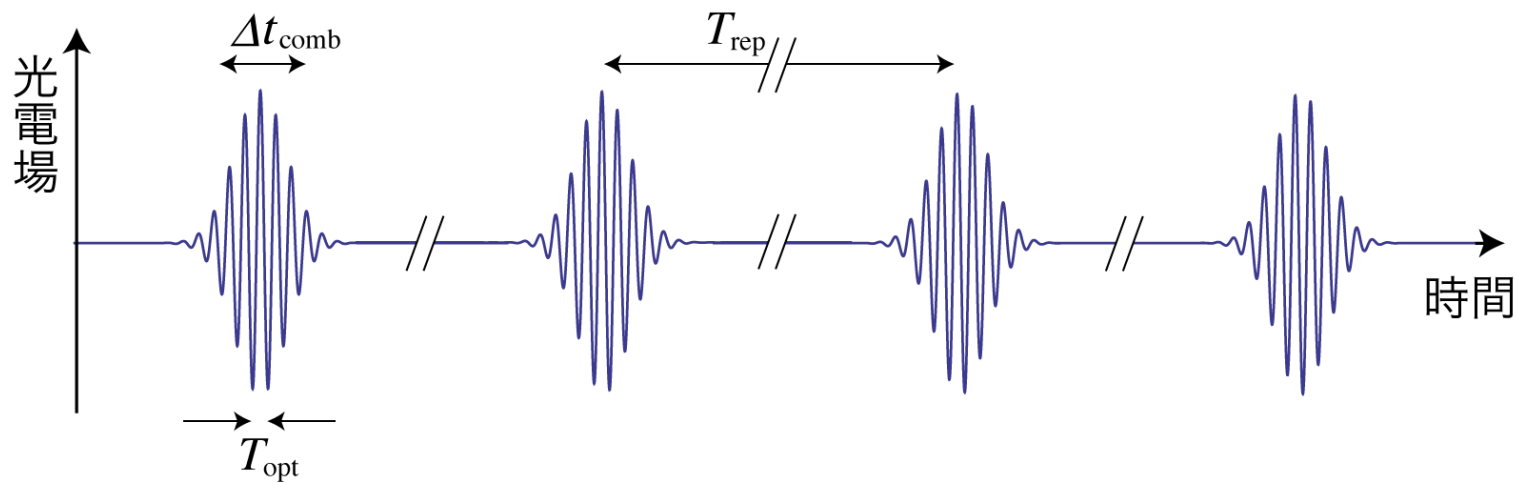
スペクトル



- 光路長の変化量により分解能が決まる
- 波長掃引を行う必要がなく、分散型分光法に比べ測定時間が速い
- 多くの光量を効率よく検出器で取り込めるため、明るい干渉波形が得られる

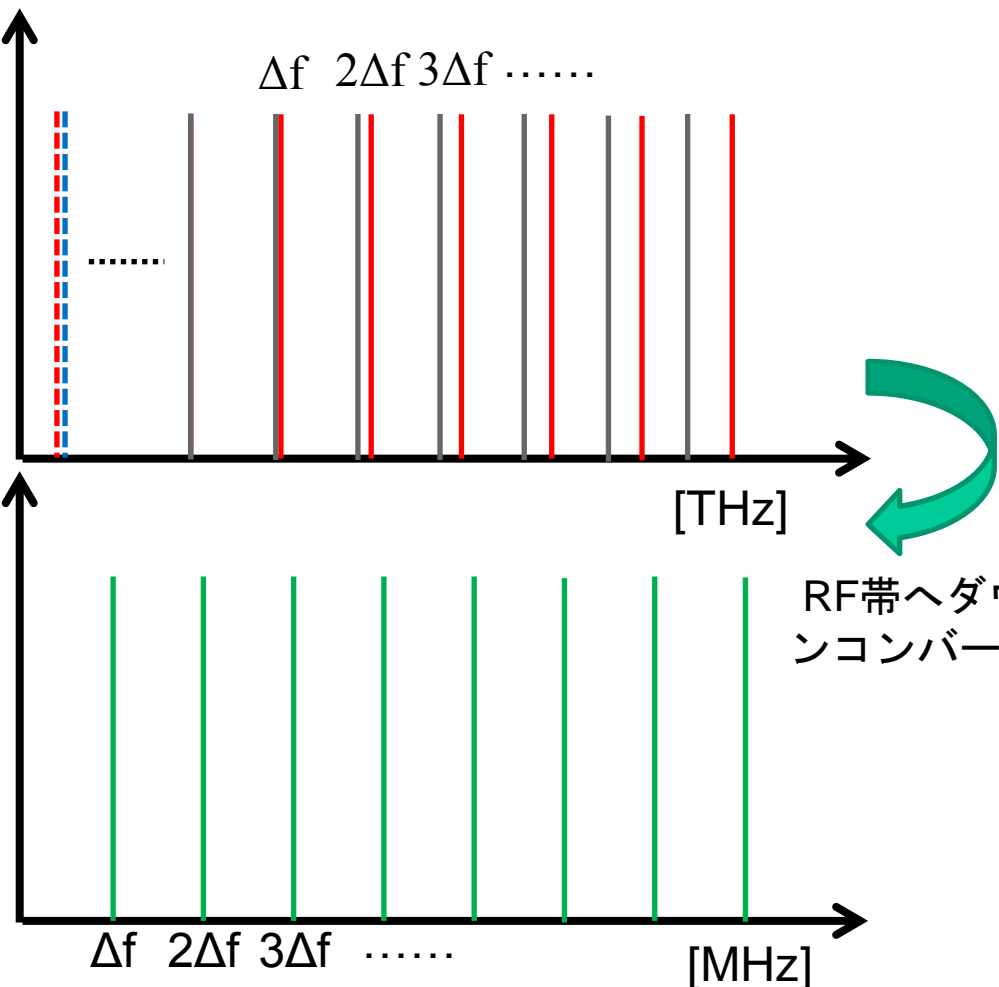


モード同期パルスレーザー



デュアルコム分光法

わずかに異なる繰り返し周波数をもつ二つのレーザーのパルス間の遅延時間の変化により、時間軸の関数としてインターフェログラムを記録し、これをフーリエ変換して周波数軸のスペクトルを得る。



1 周期のデータ取得速度

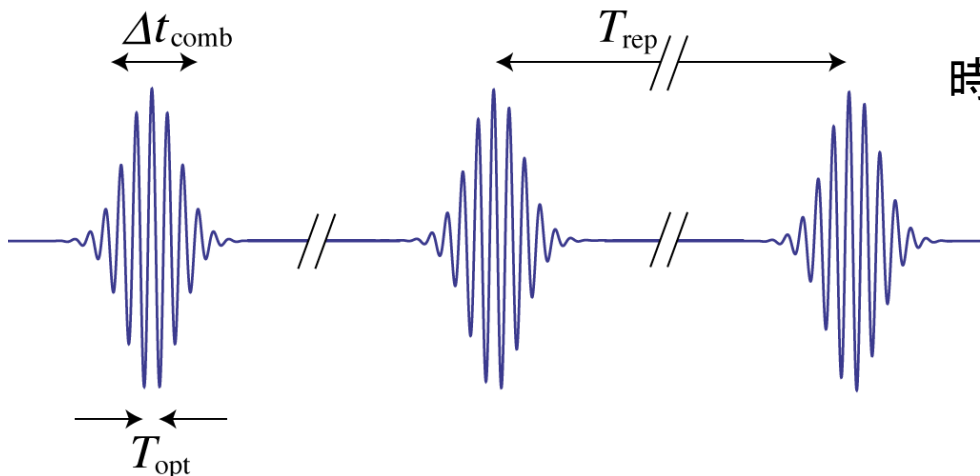
$$\frac{1}{\Delta f_{rep}}$$

フーリエ変換分光法との比較

- ・ データ取得速度が速い
- ・ 高い周波数分解能
- ・ 機械的遅延走査が不要

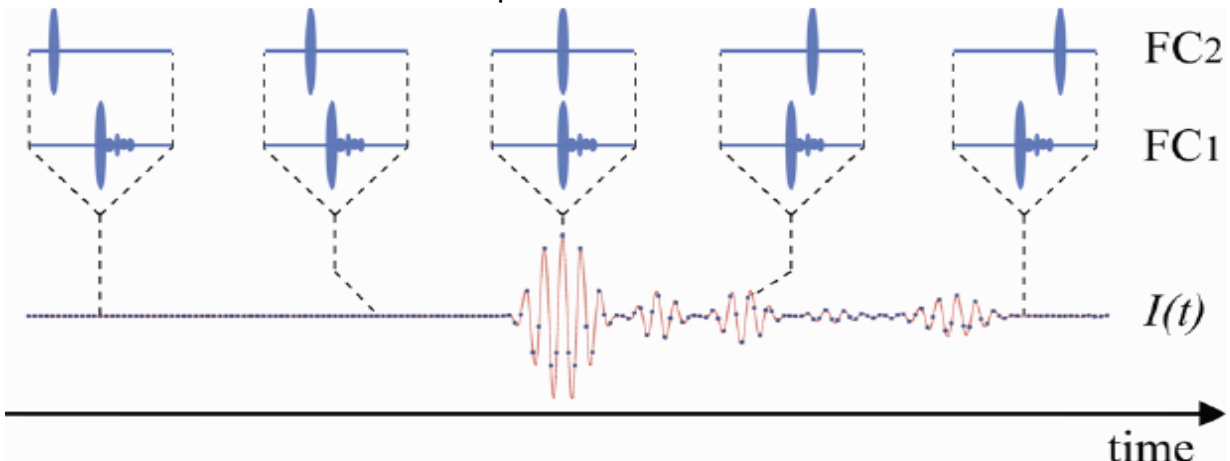
デュアルコム分光法の問題点

フリーランニングレーザーの周波数コムでは、 f_{rep} や f_{ceo} が揺らいでいる



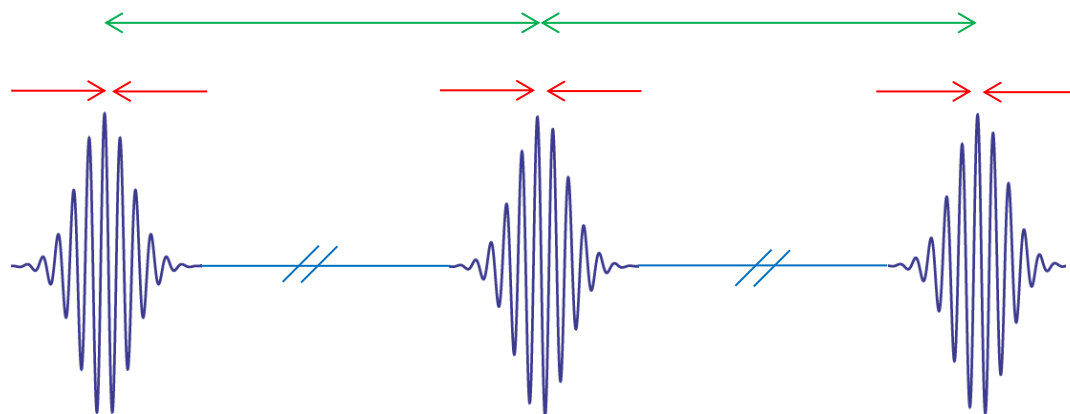
時間波形では、 T_{rep} や T_{opt} が揺らぐ

その結果、干渉波形において、
サンプリング間隔が揺らぎ (f_{rep} に起因)、干渉波形の積算ができない (f_{ceo} に起因)



デュアルコム分光法の問題点

フリーランニングレーザーの周波数コムでは、 f_{rep} や f_{ceo} が揺らいでいる



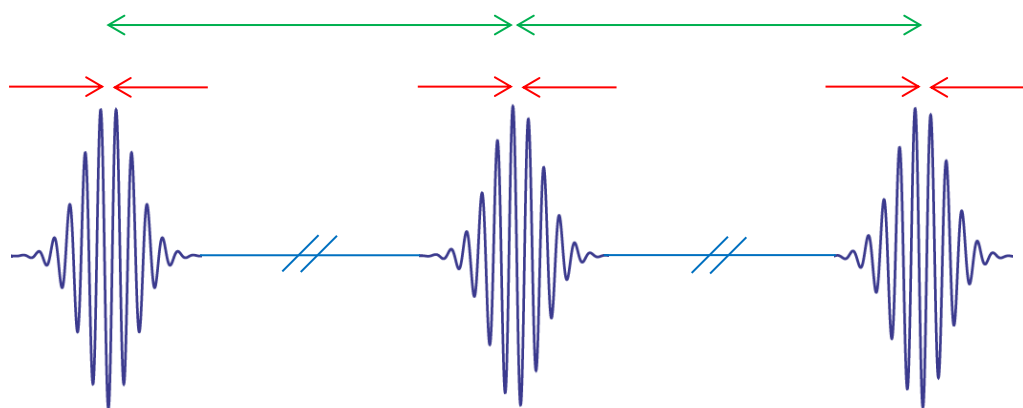
デュアルコム分光法において
キャリアの揺らぎは非常に重要

積算できな
い

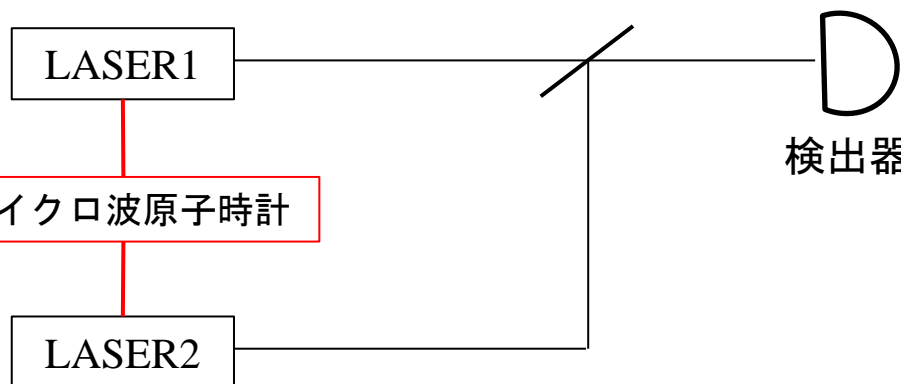
スペクトル特性の低下
(周波数分解能の低下)



f_{rep} , f_{ceo} の揺らぎを抑制する必要がある



従来のデュアルコム分光法



- 検出器
- 従来のデュアルコム分光法では、マイクロ波原子時計に二つのモード同期レーザーを安定化させていた

しかし、

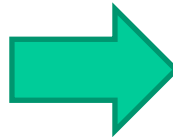
- マイクロ波原子時計 (10GHz) では、キャリアの変動 (アト秒オーダー) の揺らぎを抑えられない



狭線幅のCWレーザー (数100THz) を用いて制御を行う

イントロダクション

コムの揺らぎを抑えたい



周波数コムの中から1本のコムを抜き出し制御を行う

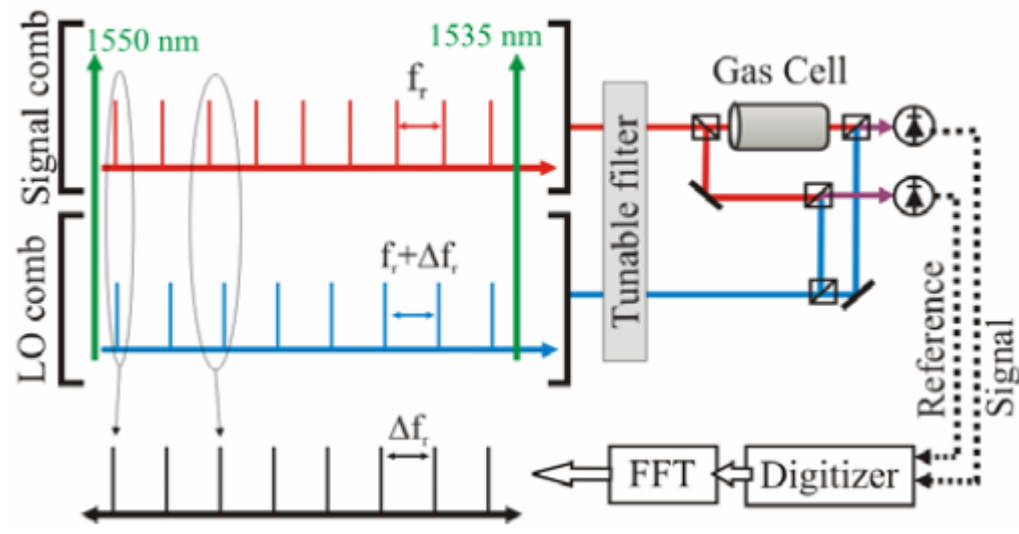
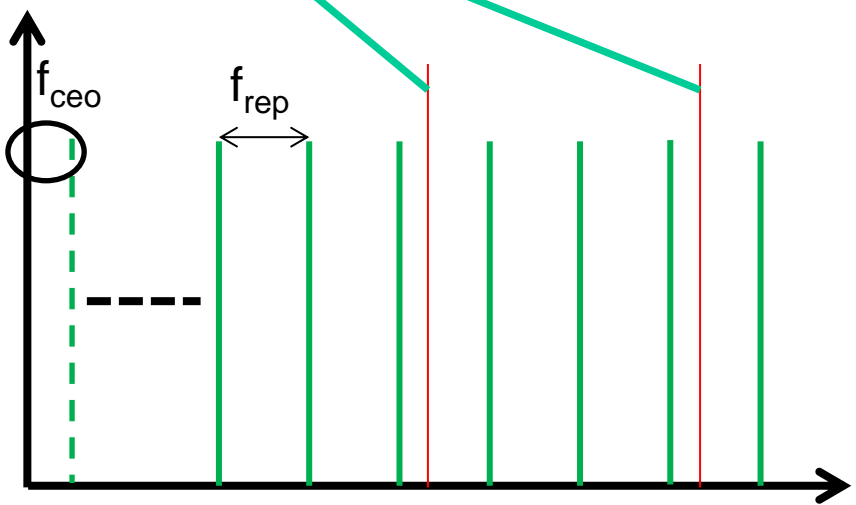
一つ目の手法

狭線幅のCWレーザーを2台用いて f_{rep} と f_{ceo} を制御する

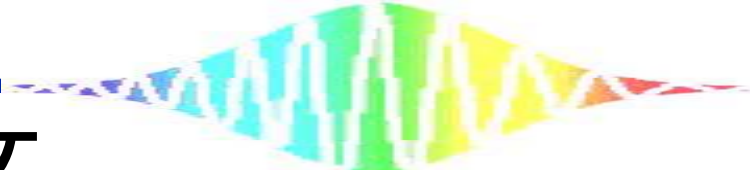
2つのCWレーザーとのビート
 f_{rep} , f_{ceo}
それぞれ安定化

狭線幅CWレーザーが必要

線幅1Hz級のCWレーザーと安定化



紹介論文



1. Jean-Daniel Deschenes, Philippe Giaccari, and Jerome Genest “Optical referencing technique with CW lasers as intermediate oscillators for continuous full delay range frequency comb interferometry” OPTICS EXPRESS, Vol 18, No.22, 23358 (2010)
2. Naoya Kuse, Akira Ozawa, and Yohei Kobayashi “Comb-Resolved Dual-Comb Spectroscopy Stabilized by Free-Running Continuous-Wave Lasers” Applied Physics Express 5 (2012) 112402
3. Takuro Ideguchi, Antonin Poisson, Guy Guelachvili, Nathalie Picqué, Theodor W. Hänsch “Adaptive real-time dual-comb spectroscopy” arXiv : 1201.4177.



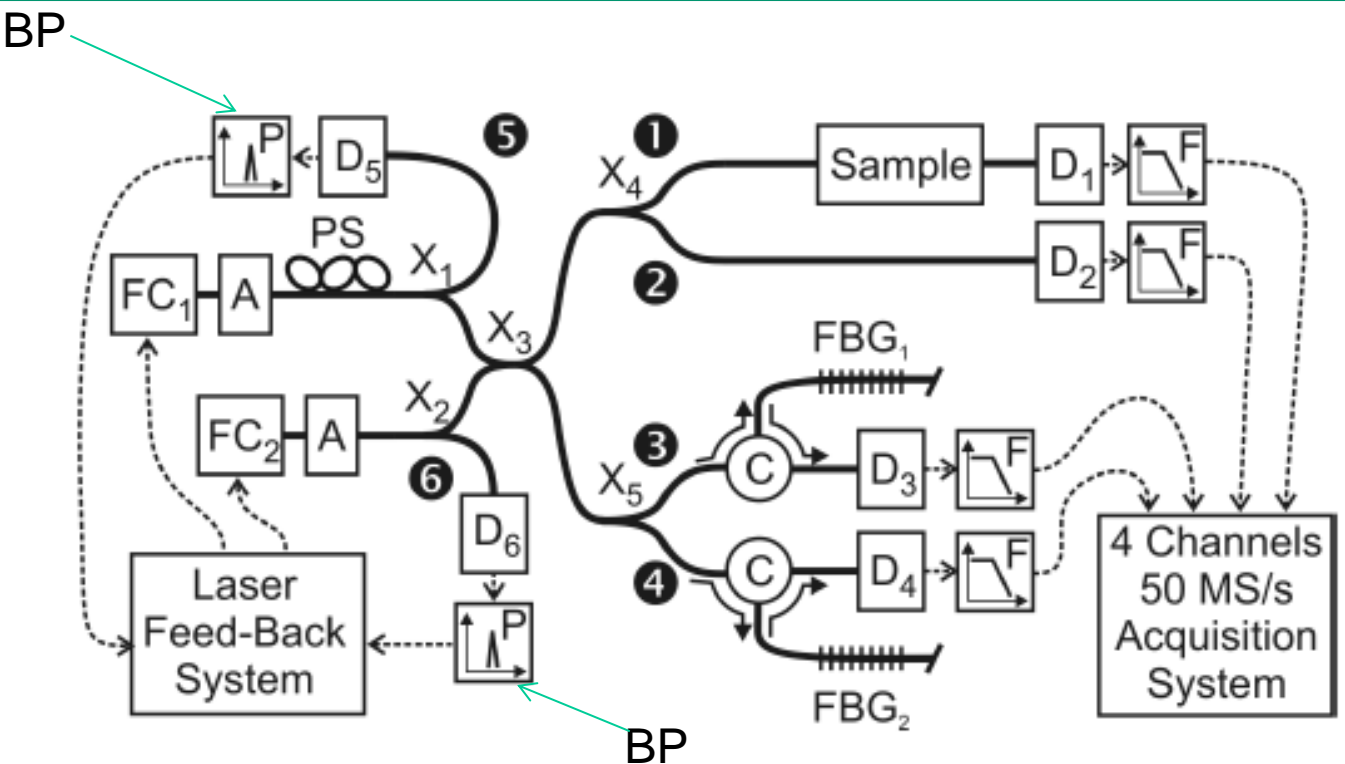
1. Optical referencing technique with CW lasers as intermediate oscillators for continuous full delay range frequency comb interferometry

CWレーザーにコムを安定化させずに、測定後に変動を補正する

周波数領域

時間領域

従来はバンドパスフィルターを用いて、複数のモードを取り出して制御していた。 → 1周期分計測できない



従来の補正アルゴリズム

バンドパスフィルタ後の信号

$$r_{1d}[k] = A_1(\Delta T_r(k)) \exp[j2\pi f_{c1} \Delta T_r(k) + j\Delta\phi(k)] \quad (1)$$

$$r_{2d}[k] = A_2(\Delta T_r(k)) \exp[j2\pi f_{c2} \Delta T_r(k) + j\Delta\phi(k)] \quad (2)$$

バランス検出器の信号

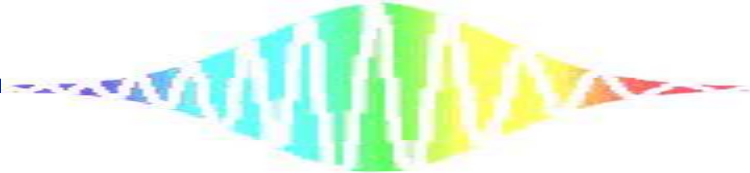
$$s_{md}[k] = A_m(\Delta T_r(k)) \exp[j2\pi f_m \Delta T_r(k) + j\Delta\phi(k)]$$

アルゴリズム

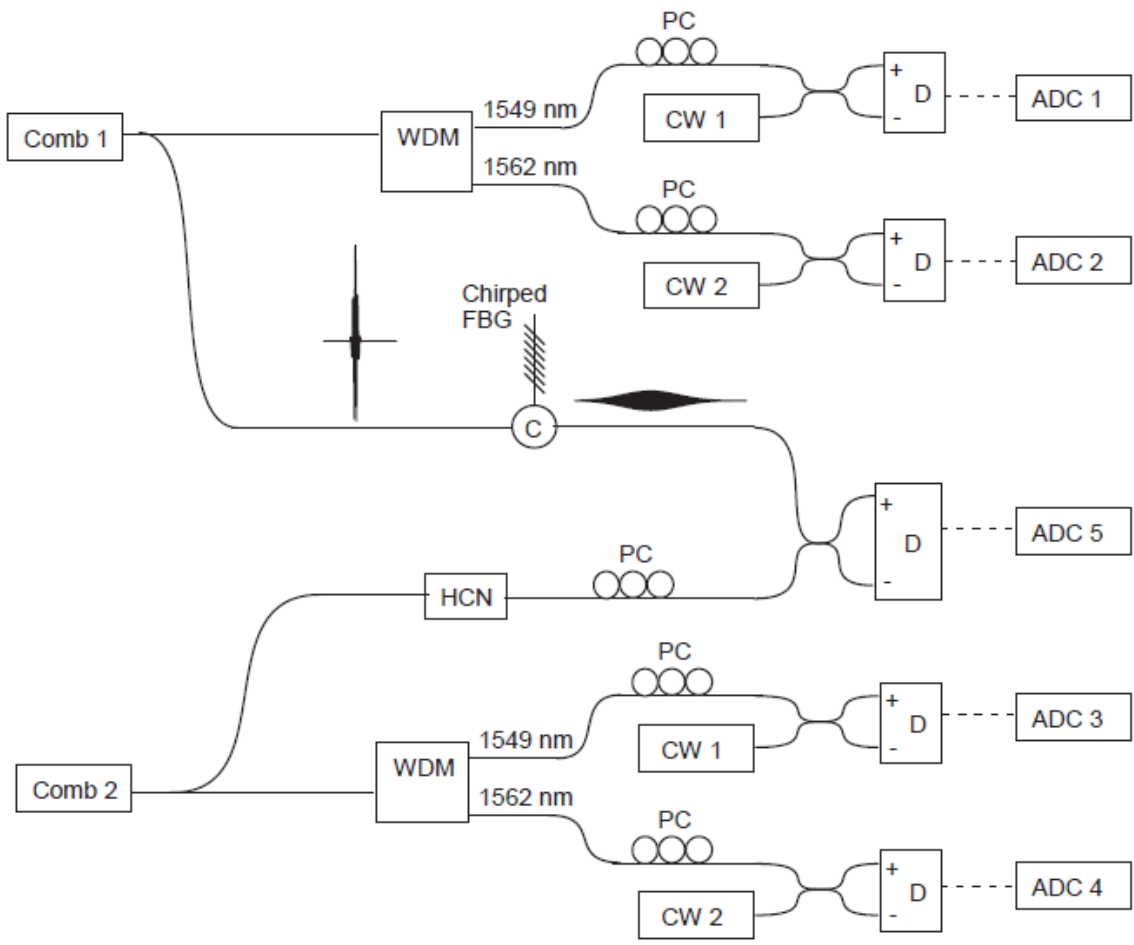
$$s_{md}[k] \frac{r_{1d}^*[k]}{\|r_{1d}[k]\|} = A_m(\Delta T_r(k)) \exp[j2\pi (f_m - f_{c1}) \Delta T_r(k)]$$



位相の変動を除去



新手法



comb1とCW1のビート

comb2とCW1のビート

Menlo System レーザー

繰り返し周波数 :

100MHz

平均パワー : 15mW

差周波 (安定化) :

100kHzとCW2のビート

comb2とCW2のビート

補正アルゴリズム

各ADCから得られる信号

$$s_{1d}[k] = \sqrt{P_{CW1}P_{FC1,\lambda1}} \exp[j2\pi f_{cw1}T_{r1}(k) + j\varphi_1(k) + j\varphi_{CW1}(kT_{r1})] \quad (3)$$

$$s_{2d}[k] = \sqrt{P_{CW1}P_{FC2,\lambda1}} \exp[j2\pi f_{cw1}T_{r2}(k) + j\varphi_2(k) + j\varphi_{CW1}(kT_{r2})] \quad (4)$$

$$s_{3d}[k] = \sqrt{P_{CW2}P_{FC1,\lambda2}} \exp[j2\pi f_{cw2}T_{r2}(k) + j\varphi_1(k) + j\varphi_{CW2}(kT_{r1})] \quad (5)$$

$$s_{4d}[k] = \sqrt{P_{CW2}P_{FC2,\lambda2}} \exp[j2\pi f_{cw2}T_{r2}(k) + j\varphi_2(k) + j\varphi_{CW2}(kT_{r2})] \quad (6)$$

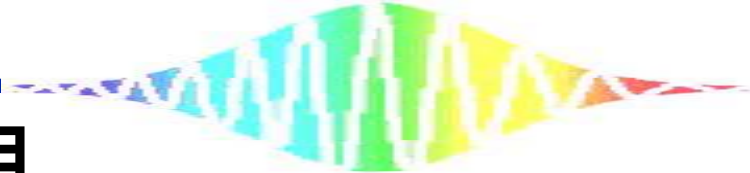
(1) × (2) 式を行う

$$r_{1d}[k] = P_{CW1} \sqrt{P_{FC1,\lambda1}P_{FC2,\lambda1}} \times \exp[j2\pi f_{cw1}\Delta T_r(k) + j\Delta\varphi(k) + j\varphi_{CW1}(T_{r1}(k)) - j\varphi_{CW1}(T_{r2}(k))] \quad (7)$$

$$r_{2d}[k] = P_{CW2} \sqrt{P_{FC2,\lambda1}P_{FC2,\lambda1}} \times \exp[j2\pi f_{cw2}\Delta T_r(k) + j\Delta\varphi(k) + j\varphi_{CW2}(T_{r1}(k)) - j\varphi_{CW2}(T_{r2}(k))] \quad (8)$$



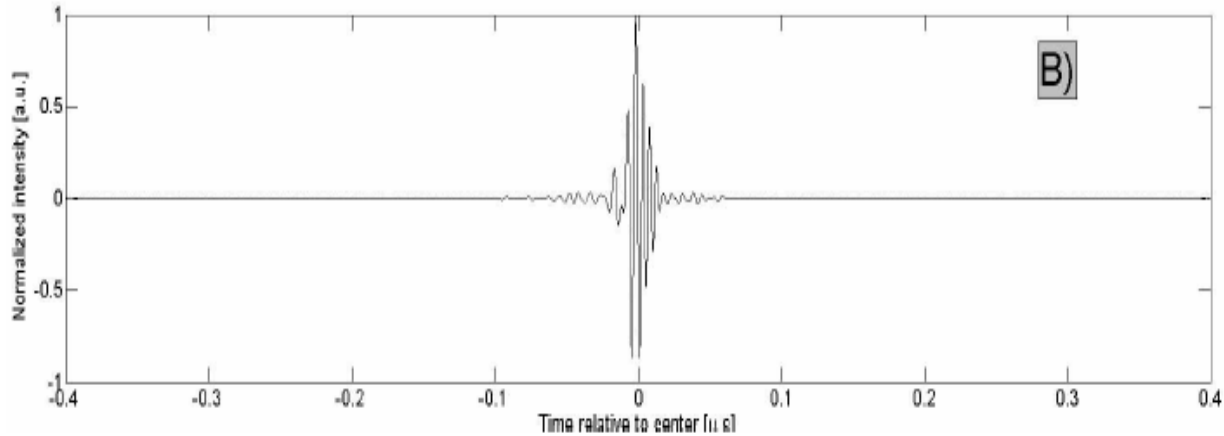
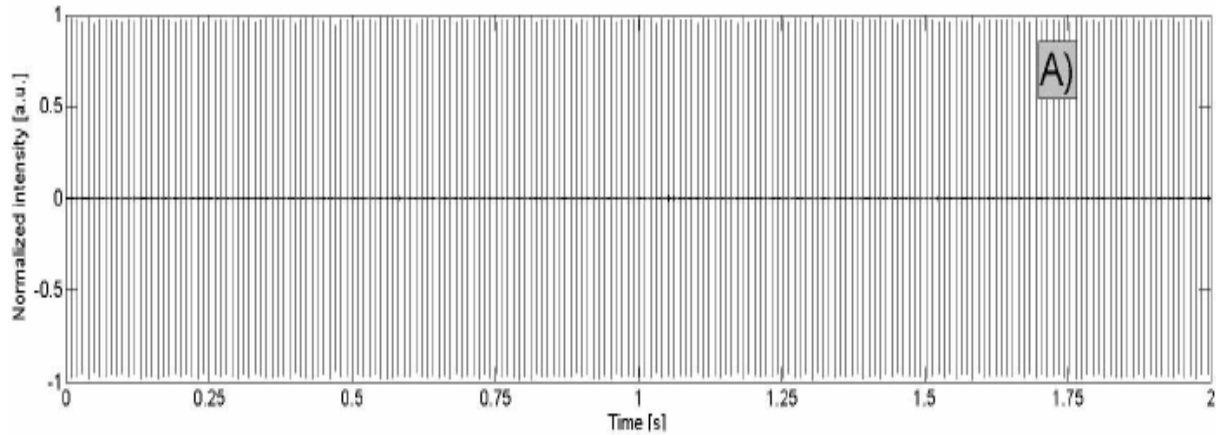
この信号から、先程と同様に $\Delta\varphi(k)$ の位相項を消す



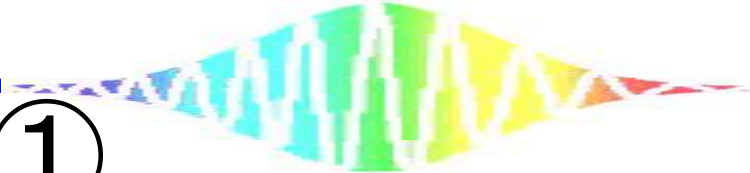
実験結果

補正後の干渉波形

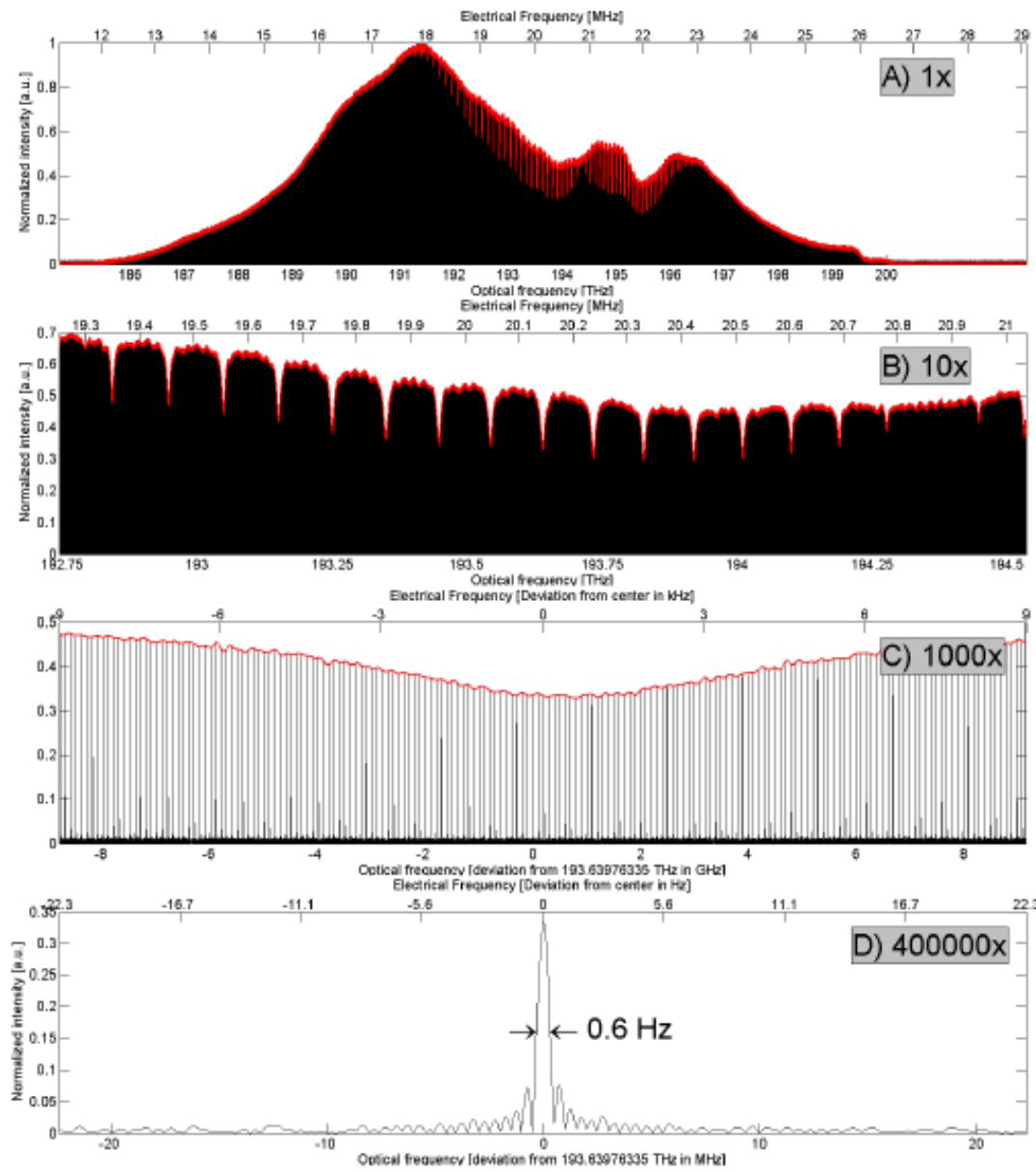
測定時間2ms



拡大

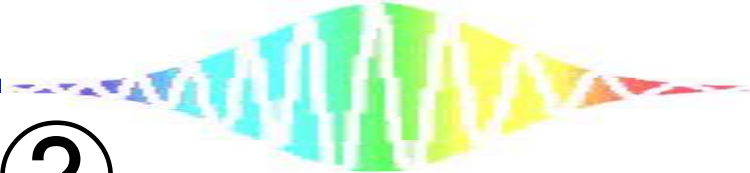


実験結果①

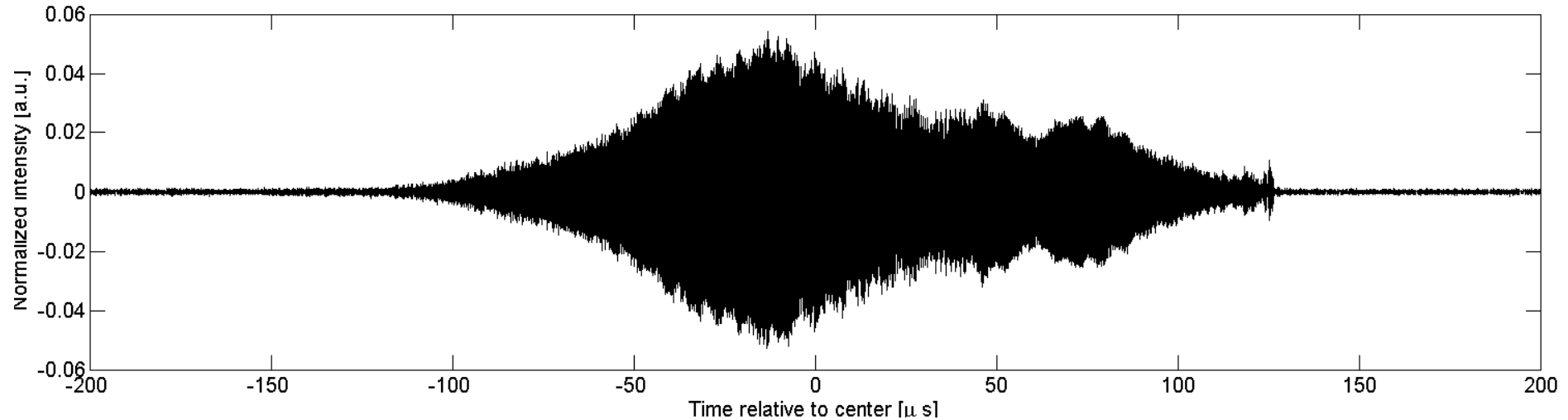


干渉波形をフーリエ変換して得られたシアン化水素の吸収スペクトル

RF帯において、0.6Hzの線幅が得られた

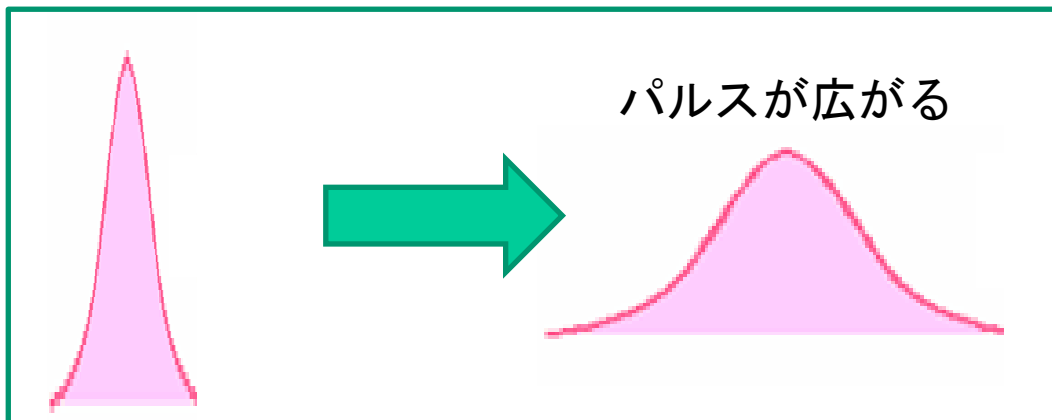


実権結果②

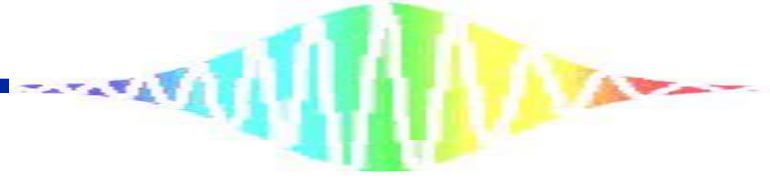


チャープFBGを用いない場合、波形が歪んでいる

チャープFBGを用いると



パルスのピークパワーが下が
り検出器の飽和がなくなる



まとめ①

- 補正アルゴリズムを用いて、CWレーザーにコムを安定化させずにデュアルコム分光法を行なった。
- 得られた干渉波形から位相変動を補正したため、絶対周波数は与えられない

2. “Comb-Resolved Dual-Comb Spectroscopy Stabilized by Free-Running Continuous-Wave Lasers”

従来は...

2台の狭線幅のCWレーザーによって安定化させていた

問題点

- 線幅1Hz級の狭線幅CWレーザーが必要

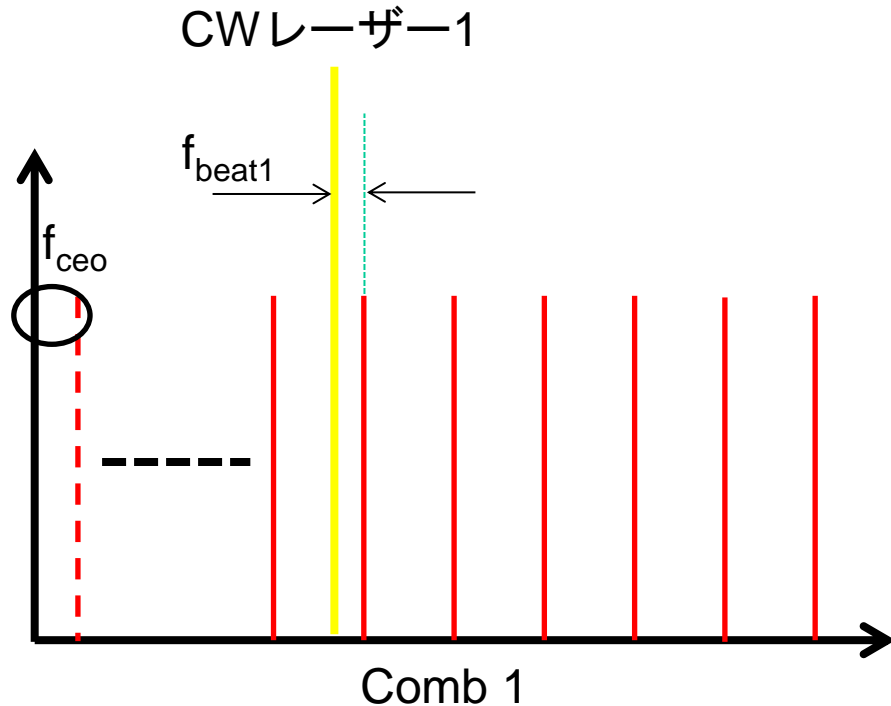


本論文では...

フリーランニングCWレーザーのみを用いて二つのコムを相対的に安定化させる

- 複雑なデータ処理を必要としない

測定原理



CWレーザーと2台のファイバーレーザーとのビート周波数は、

$$f_{\text{beat1}} = f_{\text{ceo1}} + n f_{\text{rep1}} - f_{\text{CW}}$$

$$f_{\text{beat2}} = f_{\text{ceo2}} + m f_{\text{rep2}} - f_{\text{CW}}$$

f_{beat1} と f_{beat2} をミキシング

$$f_{\text{beat1}} - f_{\text{beat2}} =$$

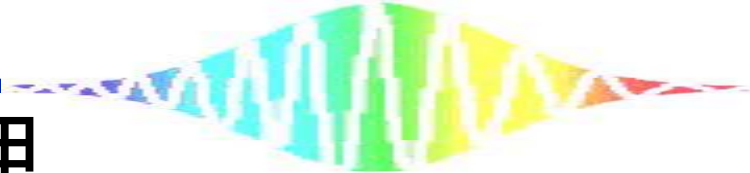
$$\frac{f_{\text{ceo1}} - f_{\text{ceo2}} + n f_{\text{rep1}} - m f_{\text{rep2}}}{\text{CWレーザーの項が消える}}$$

CWレーザーの項が消える

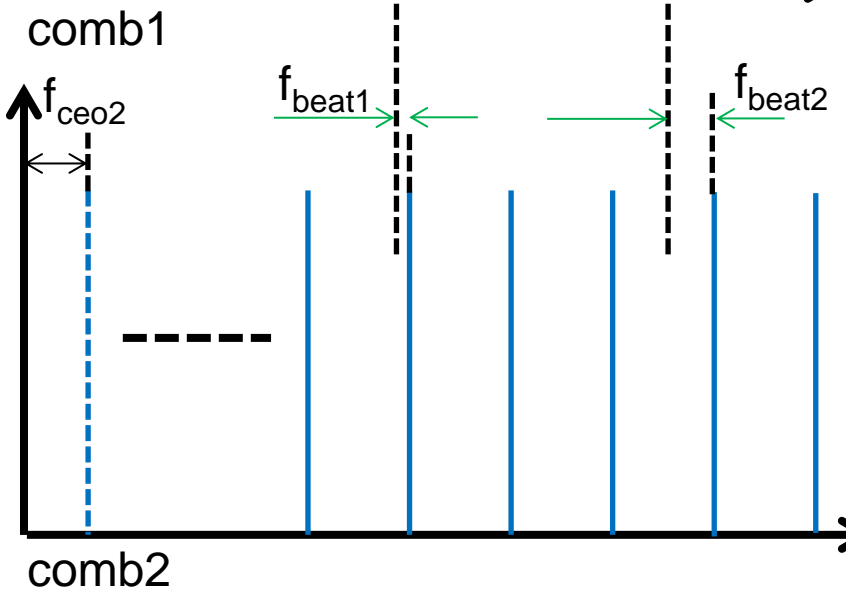
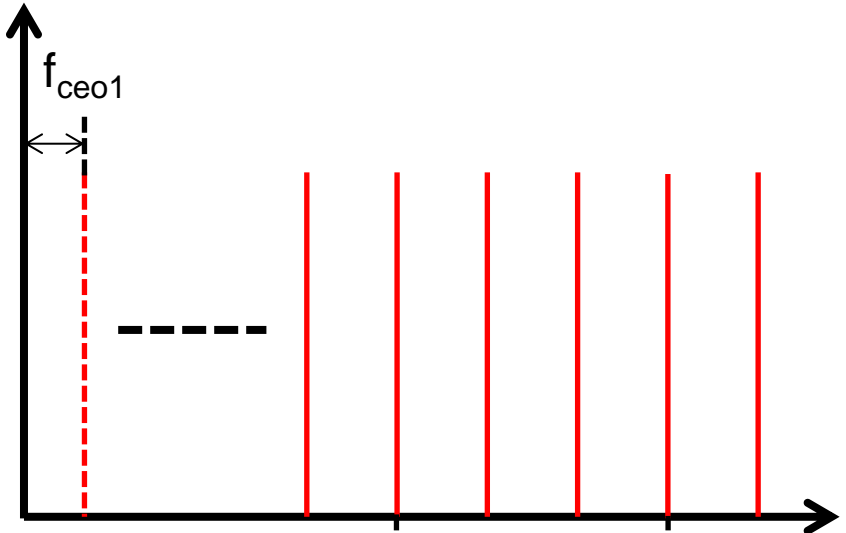


それぞれの発振器に
フィードバック

二つのコムを相対
的に安定化



測定原理



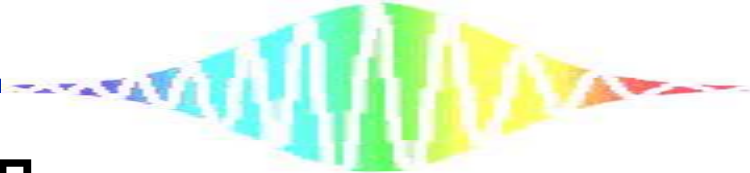
f_{beat1} を comb1 の励起電流 (f_{ceo1}) にフィードバックし、comb2 に安定化



f_{beat2} を comb2 の励起電流 (f_{ceo1}) にフィードバックし、comb1 に安定化

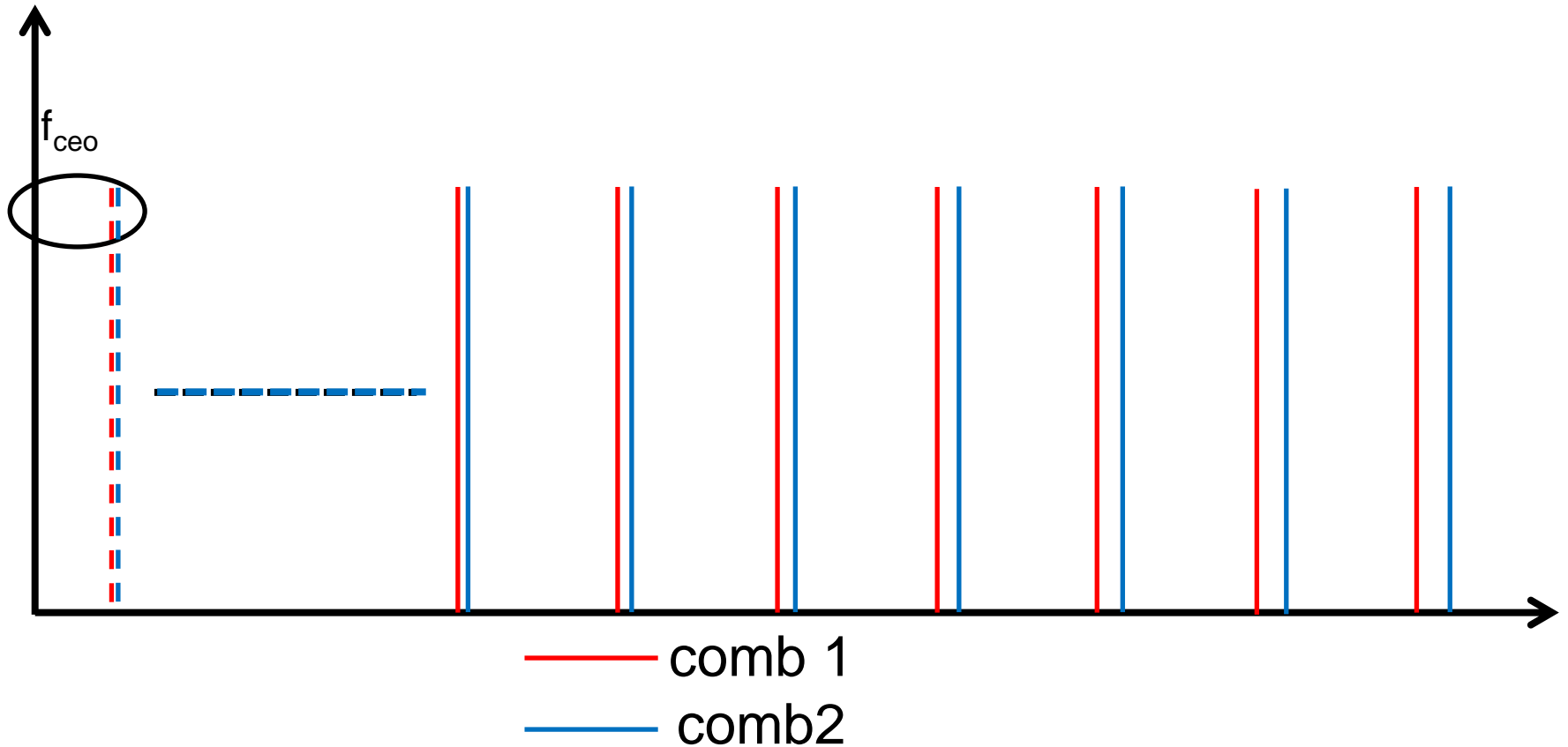


2本のコム間のビートが安定化しているため、2台のレーザーが相対的に安定化



測定原理

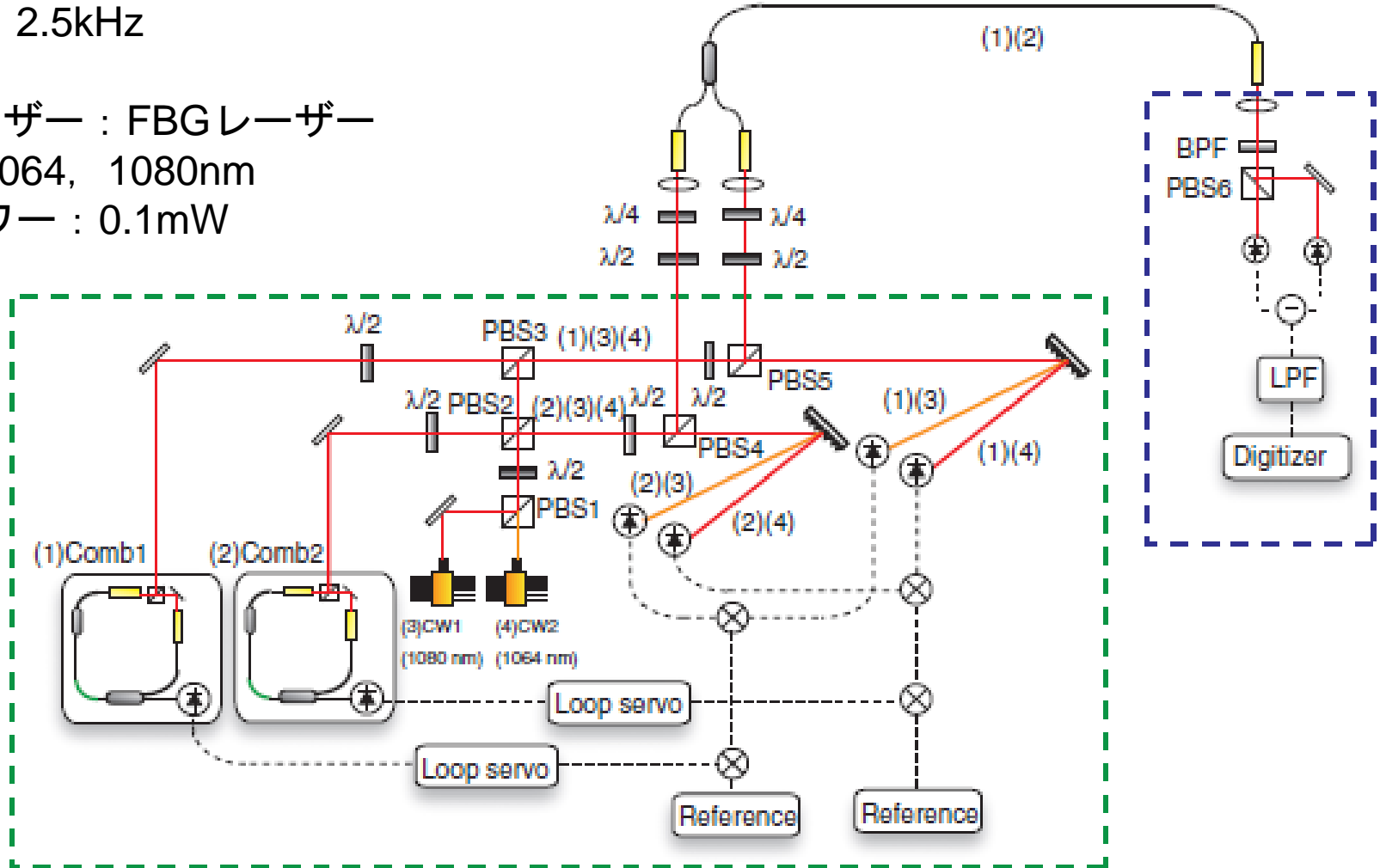
2台のコムの相対同期



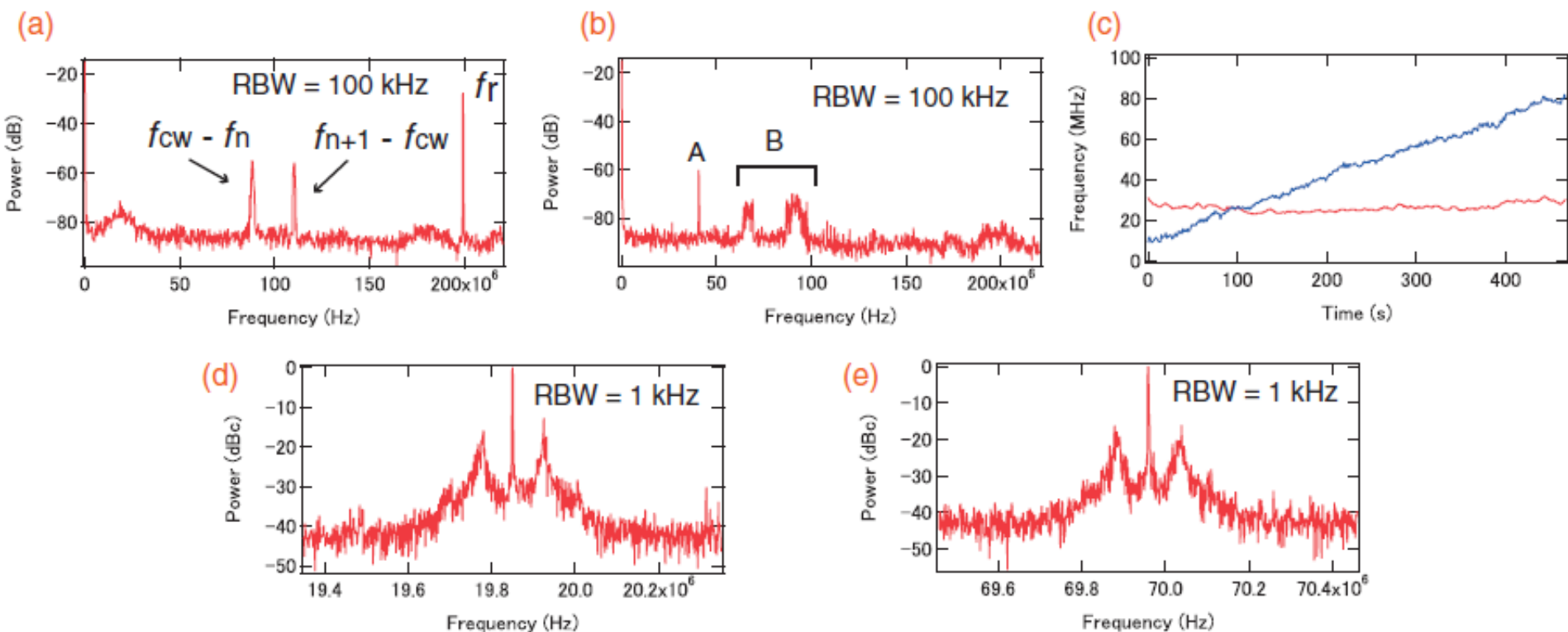
実験光学系

Comb1,2 : モード同期ファイバーレーザー
 繰り返し周波数 : 200MHz
 差周波 : 2.5kHz

CWレーザー : FBGレーザー
 波長 : 1064, 1080nm
 平均パワー : 0.1mW

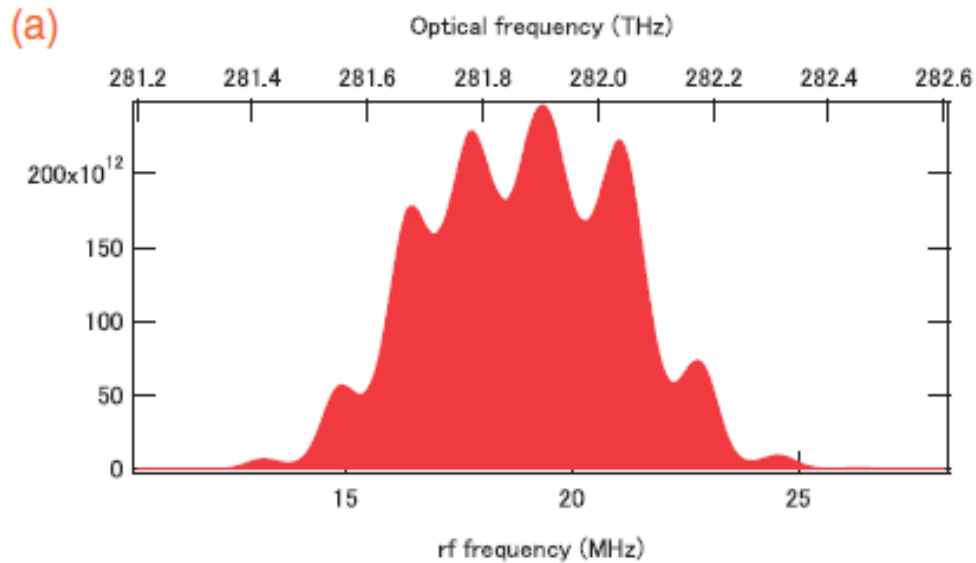
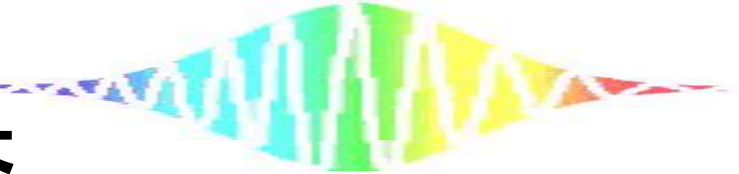


測定結果

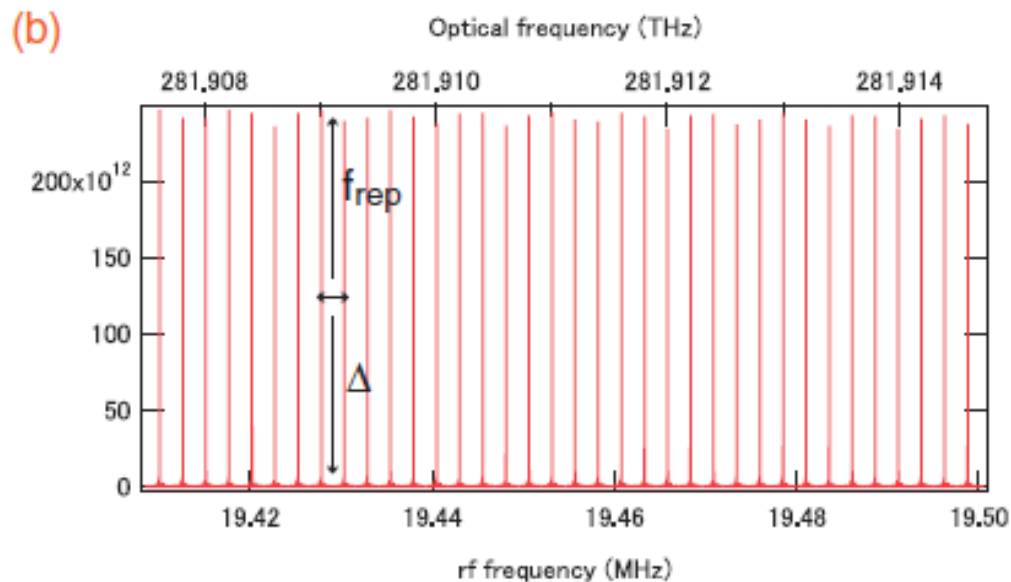


- (a) モード同期レーザとフリーランニングCWレーザのRFビートスペクトル
 (b) 二つのRFビートをミキシングして得た2つのモード同期レーザ間のビート
 (c) 青い線はCWレーザとコム RFビートのドリフト、赤い線はcomb1とcomb2のRFビート
 (d) 1064 nmでの同期ビート信号
 (e) 1080 nmでの同期ビート信号

測定結果



- 時間領域の干渉波形をフーリエ変換して得られたスペクトル (150ms)



- コム間隔が差周波である縦モード

まとめ②

- フリーランニングCWレーザーを用いて、相対的に二つのモード同期レーザーを安定化し、デュアルコム分光法を行った。
- 2台のコムは全体で見ると揺らいでいるため、絶対周波数は与えられない

3. “Adaptive real-time dual-comb spectroscopy”

従来は...

2台の狭線幅のCWレーザーによって安定化させていた

問題点

- 1Hz程の狭線幅CWレーザーが必要



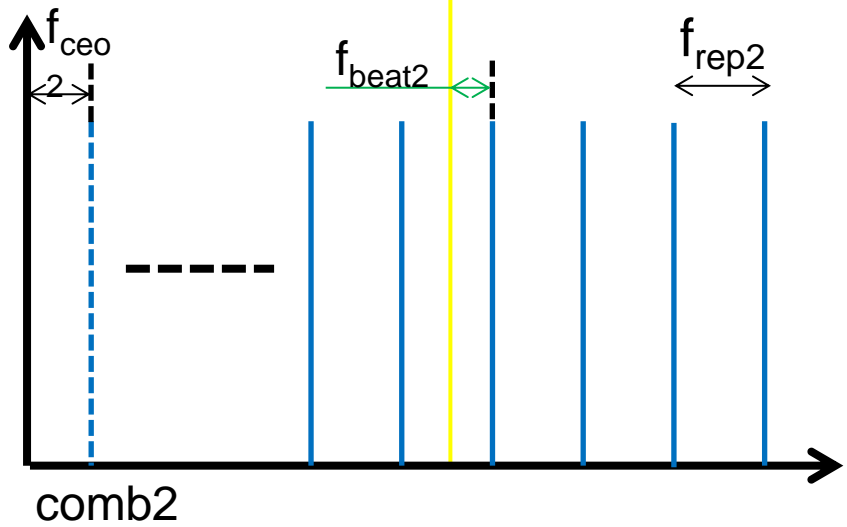
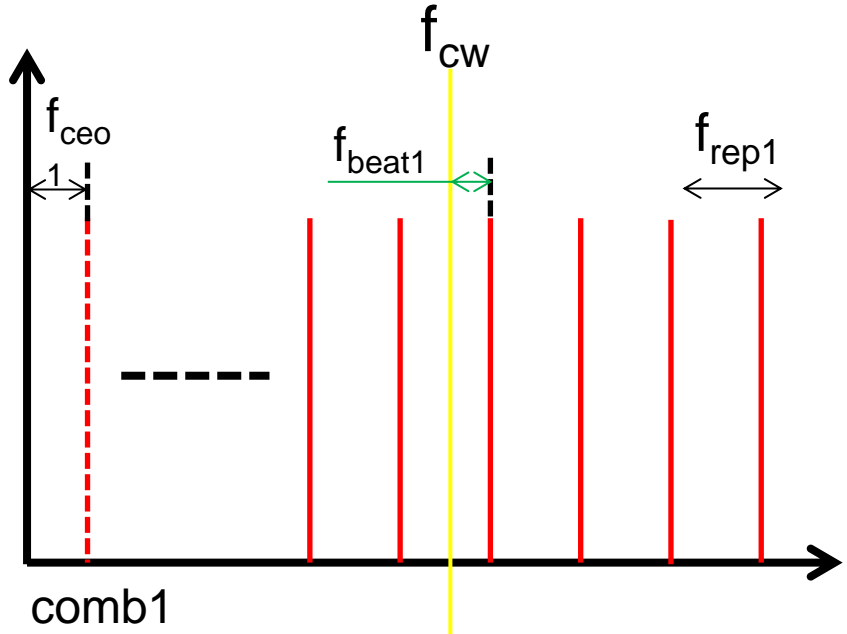
本論文では...

フリーランニングCWレーザーのみを用い、
位相同期をせずにデュアルコム分光法を
行っている

- 複雑なデータ処理を必要としない
- 位相同期をしない



3. “Adaptive real-time dual-comb spectroscopy”



CWレーザーと2台のファイバーレーザーとのビート周波数は、

$$f_{beat1} = f_{ceo1} + n f_{rep1} - f_{cw}$$

$$f_{beat2} = f_{ceo2} + m f_{rep2} - f_{cw}$$

f_{beat1} と f_{beat2} をミキシング

$$f_{beat1} - f_{beat2} = \frac{f_{ceo1} - f_{ceo2} + n f_{rep1} - m f_{rep2}}{2}$$

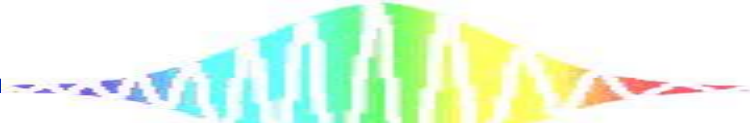
2台のコムの相対的な揺らぎ

この信号をさらにミキシング

$$f_a = (m - n) \Delta f_{rep}$$

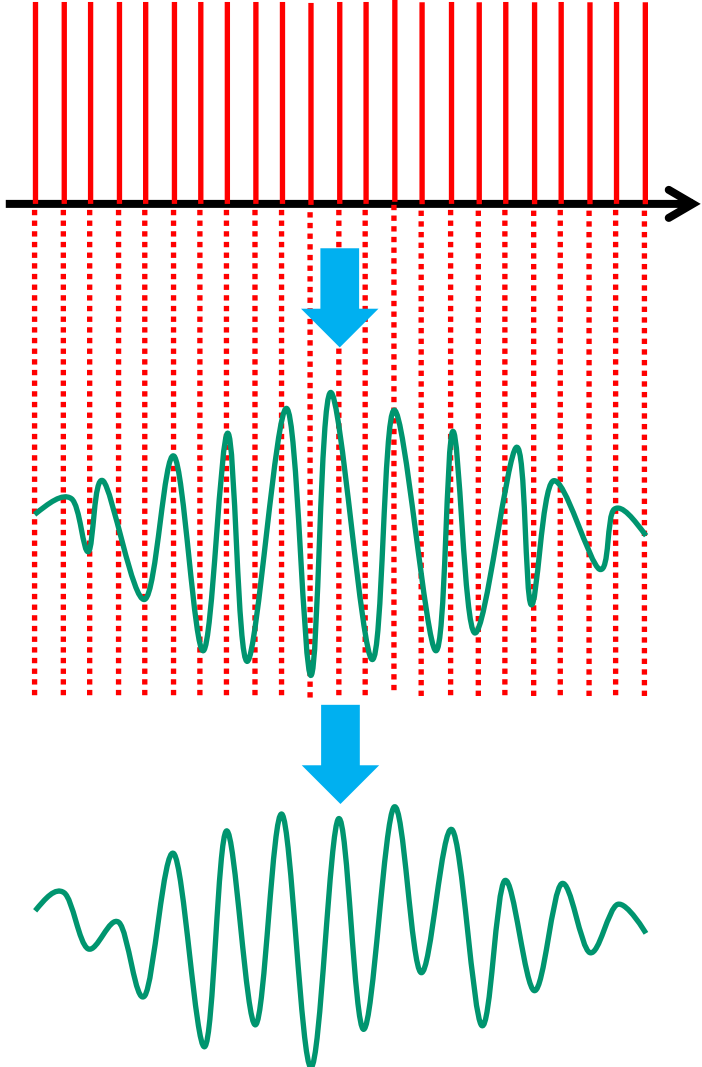
- ・ 干渉信号とミキシング
- ・ クロックとして利用

アダプティブサンプリング

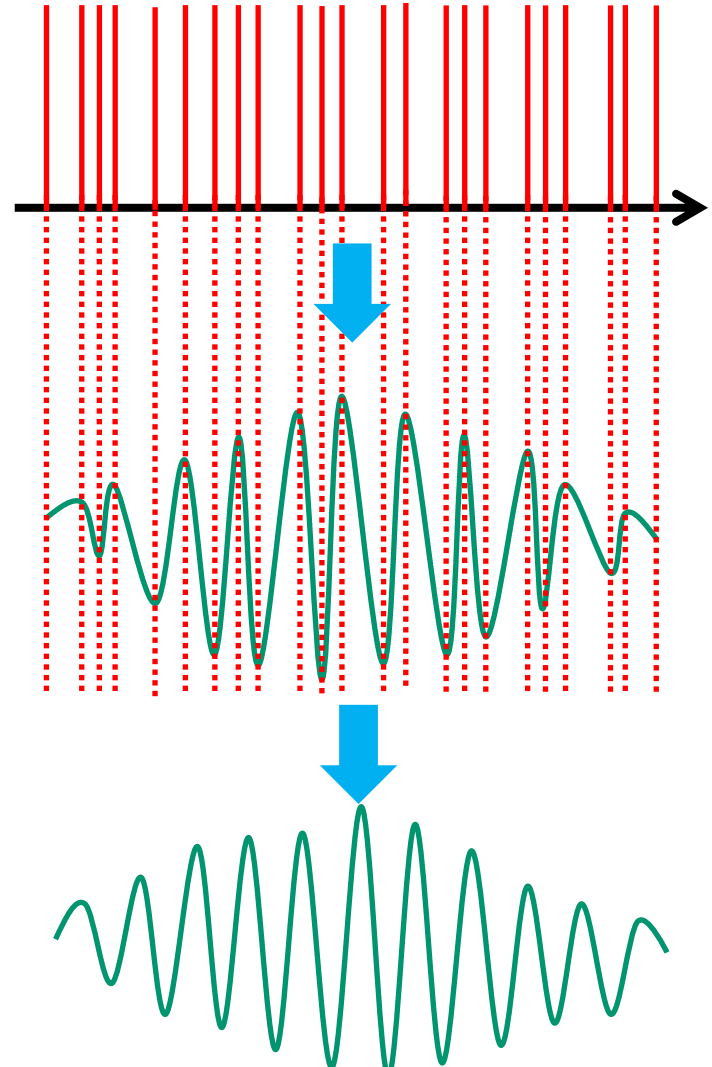


アダプティブサンプリングの測定原理

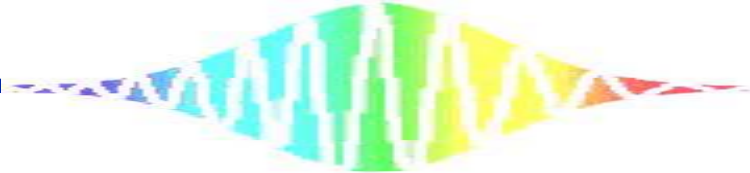
従来法 (コンスタントクロック)



アダプティブサンプリング



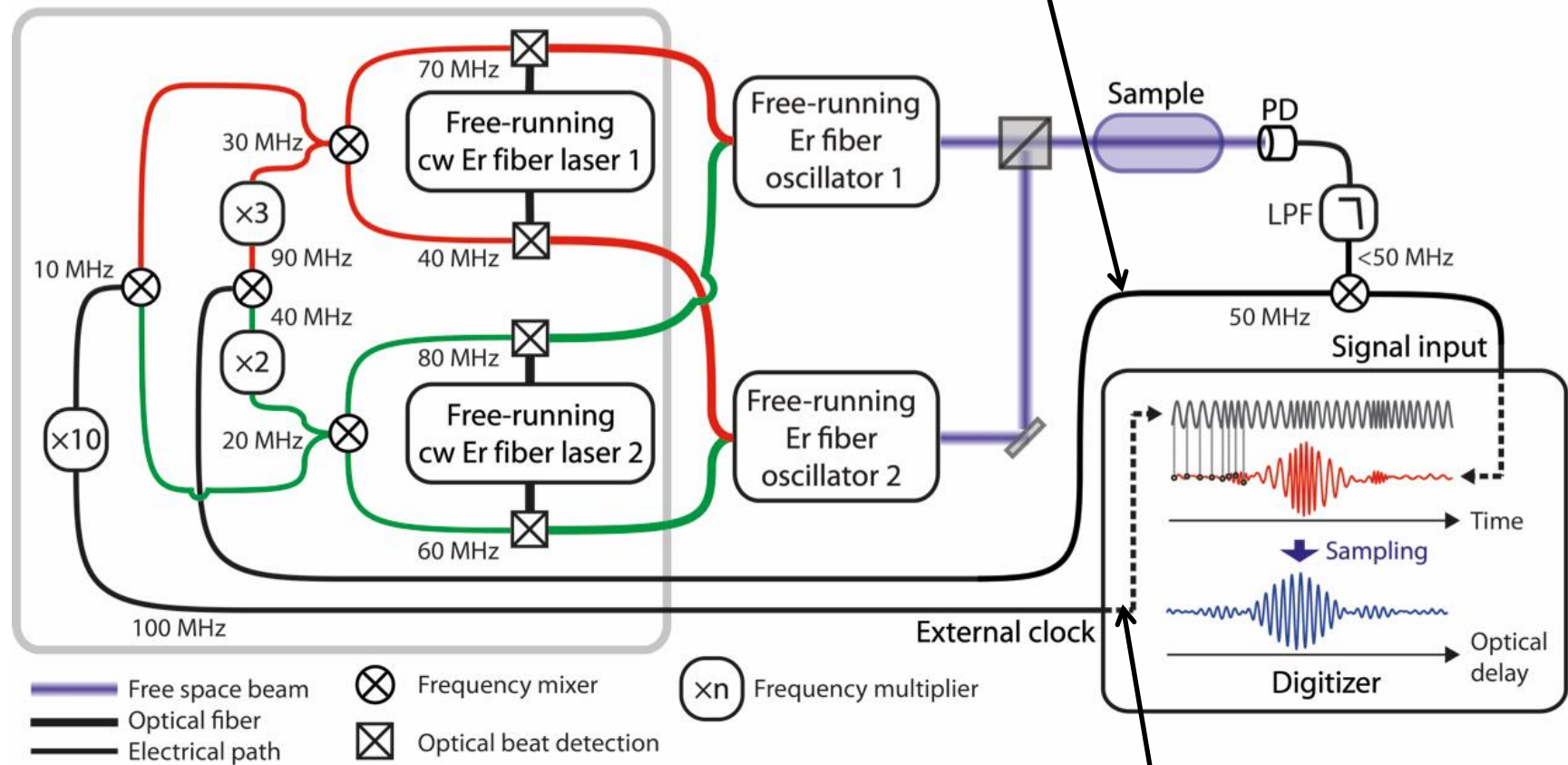
2台のレーザーの位相同期をせず、正確にサンプリングできる



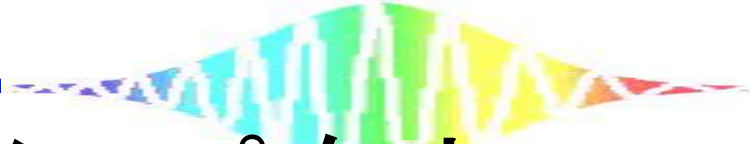
実験系

干渉信号とミキシング

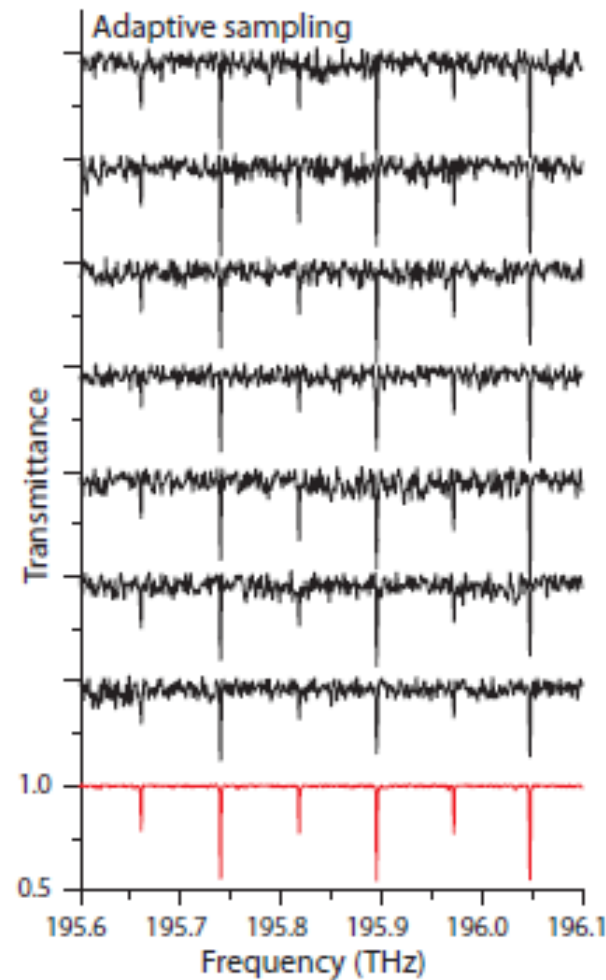
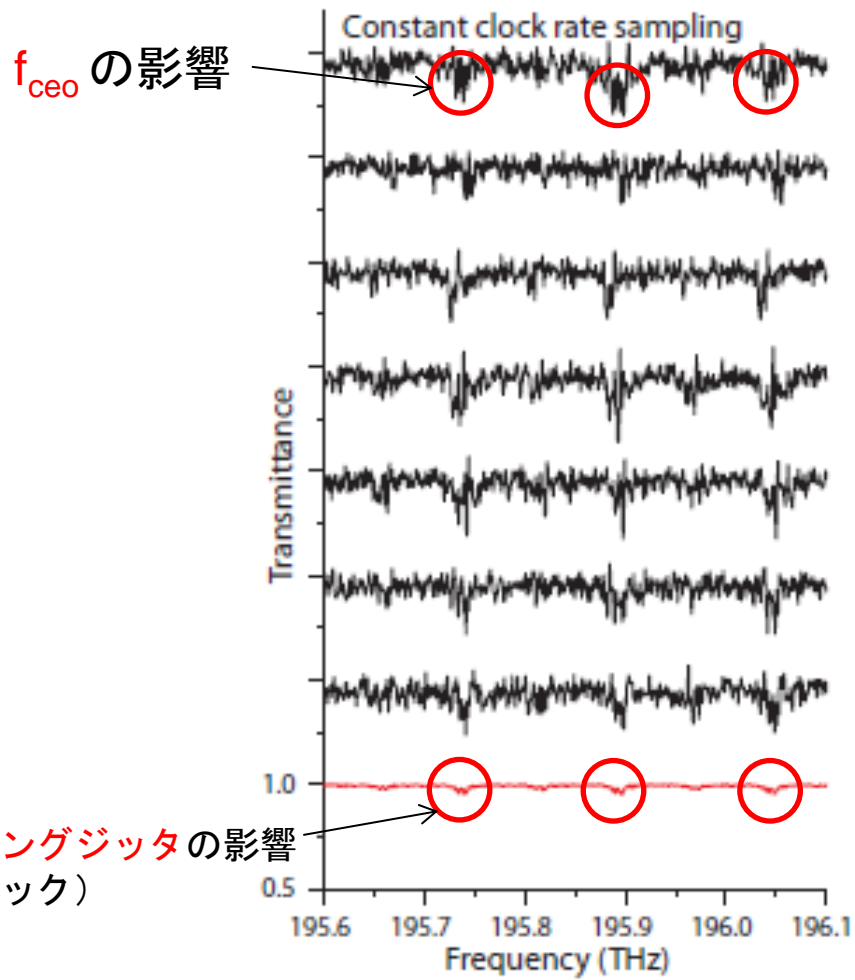
繰り返し周波数 : 100MHz
差周波 : 350Hz



クロックとして使用
(アダプティブクロック)

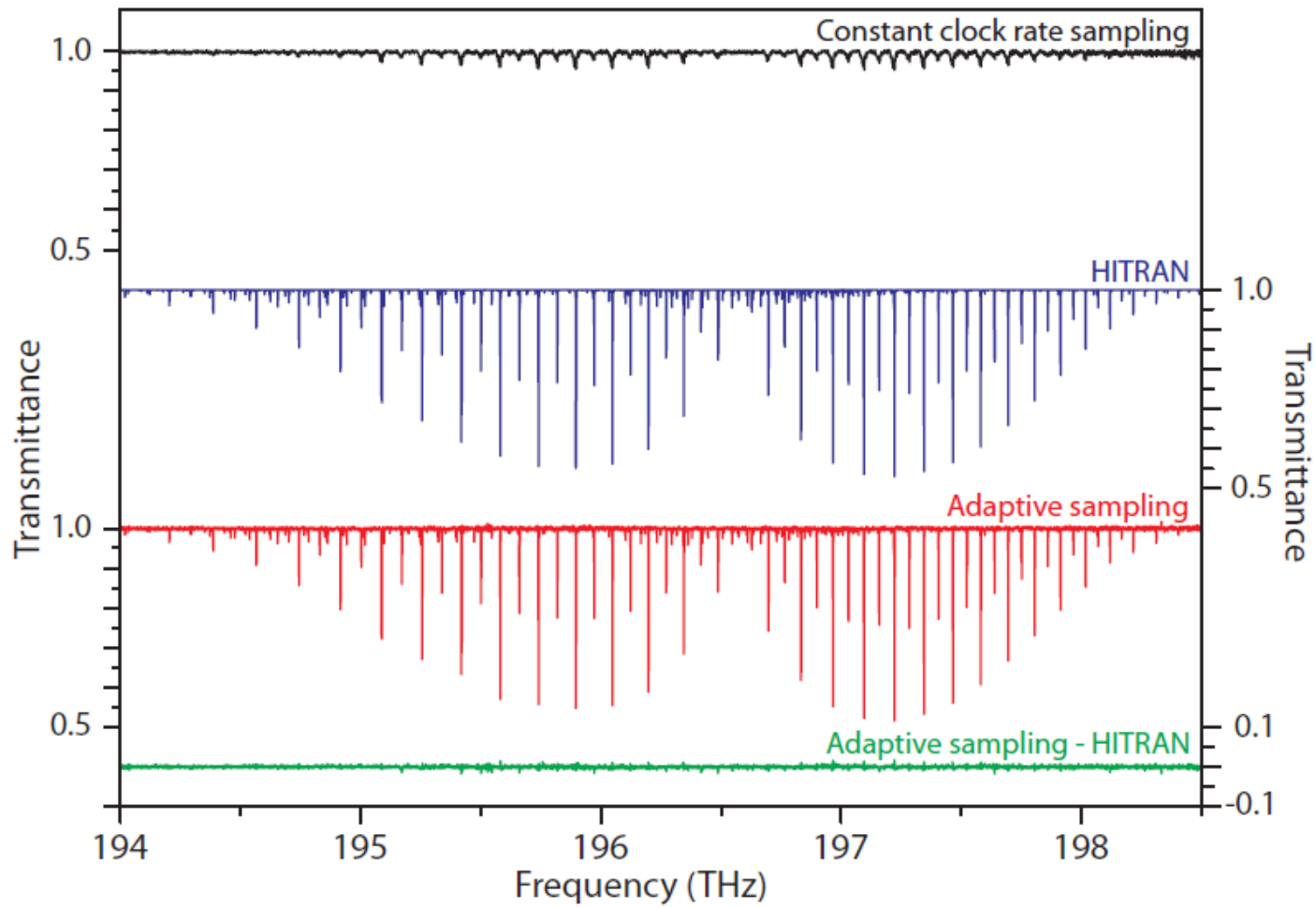


天然アセチレン分光スペクトル

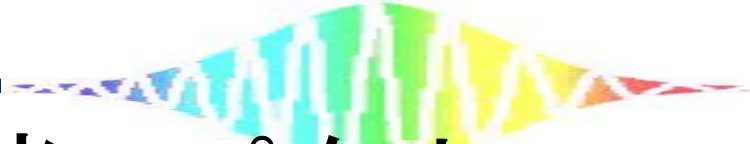


コンスタントクロックを用いた場合は、サンプリングの揺らぎを補正できていない

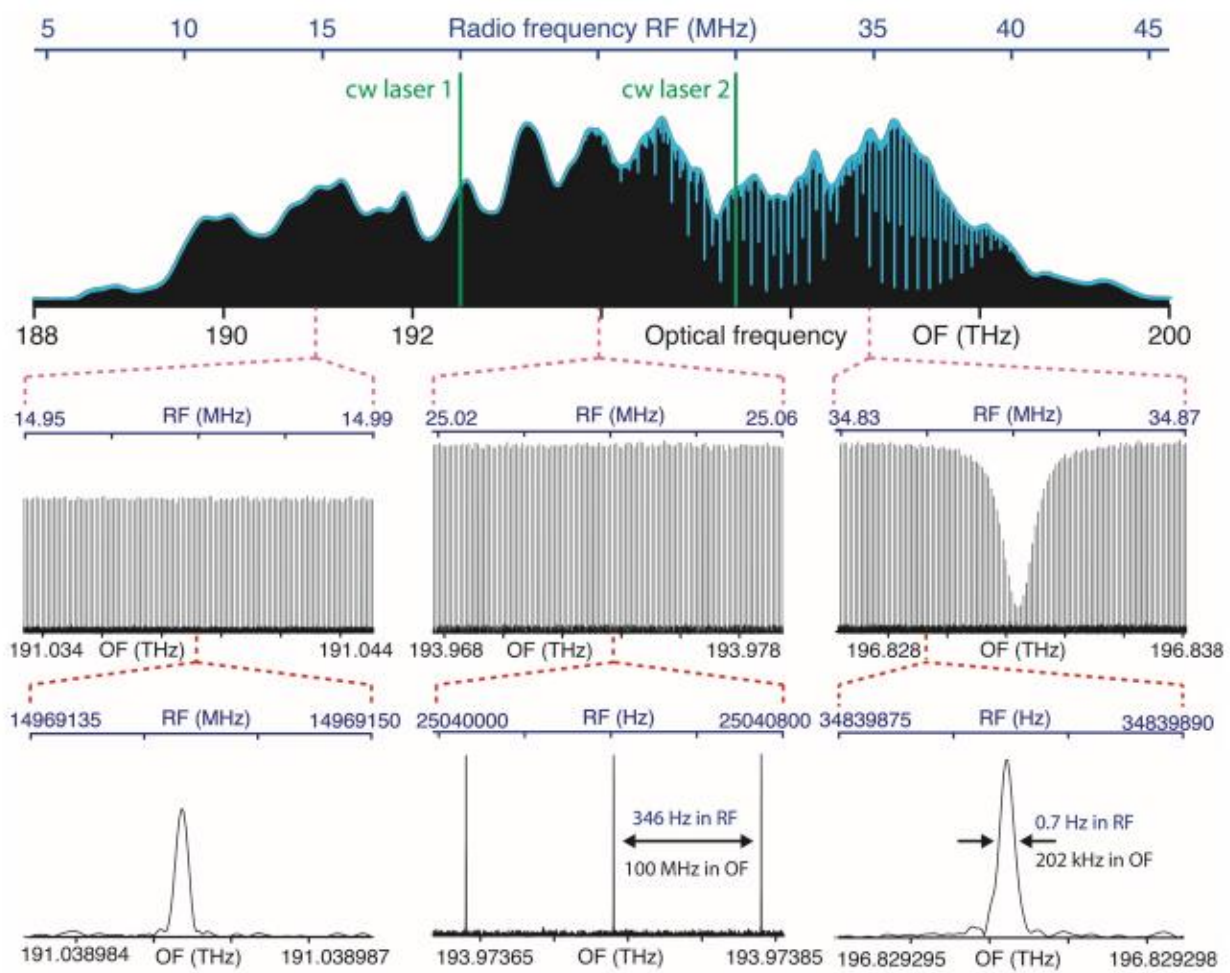
実験結果



HITRANのデータベースから得たスペクトルとの残差は1.5%

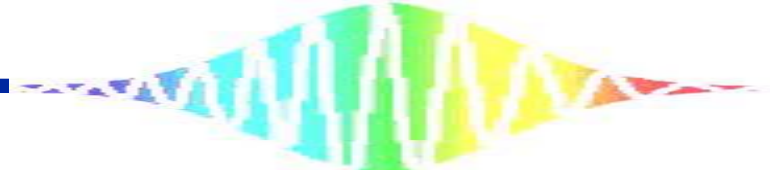


天然アセチレンの分光スペクトル



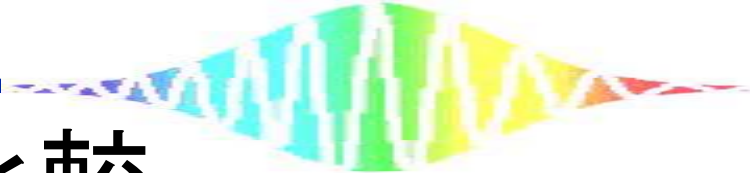
268 × 10⁶個のスペクトルを2.7秒で測定

フーリエ変換分光法では、数時間で10⁵個のスペクトル、100MHzの分解能



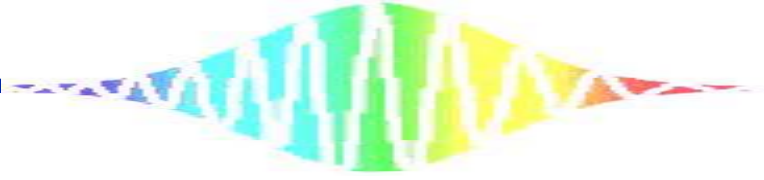
まとめ③

- アダプティブ信号を用いることによって、フリーランニングファイバーレーザーのみを使用し、実時間デュアルコム分光法を行った。
- 非常に短い時間においてサンプルの吸収スペクトルの算出が可能であり、正確性も確認できた。
- 絶対周波数は与えられない



各手法の比較

	狭線幅CW レーザー	測定後 に補正	相対 位相同期	アダプティブ サンプリング
コスト	×	○	○	○
絶対 周波数	○	×	×	×
測定 時間	○	△	○	○



まとめ

- 絶対周波数基準に安定化しないデュアルコム分光法を示した。
- デュアルコム分光法において、コムの揺らぎを抑制することは重要であるが、揺らぎを抑制しない手法もあることを学んだ。