

ERATO ミーティング

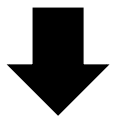
非制御シングルPC-THzスペアナ

2015/10/09 M1 水口達也

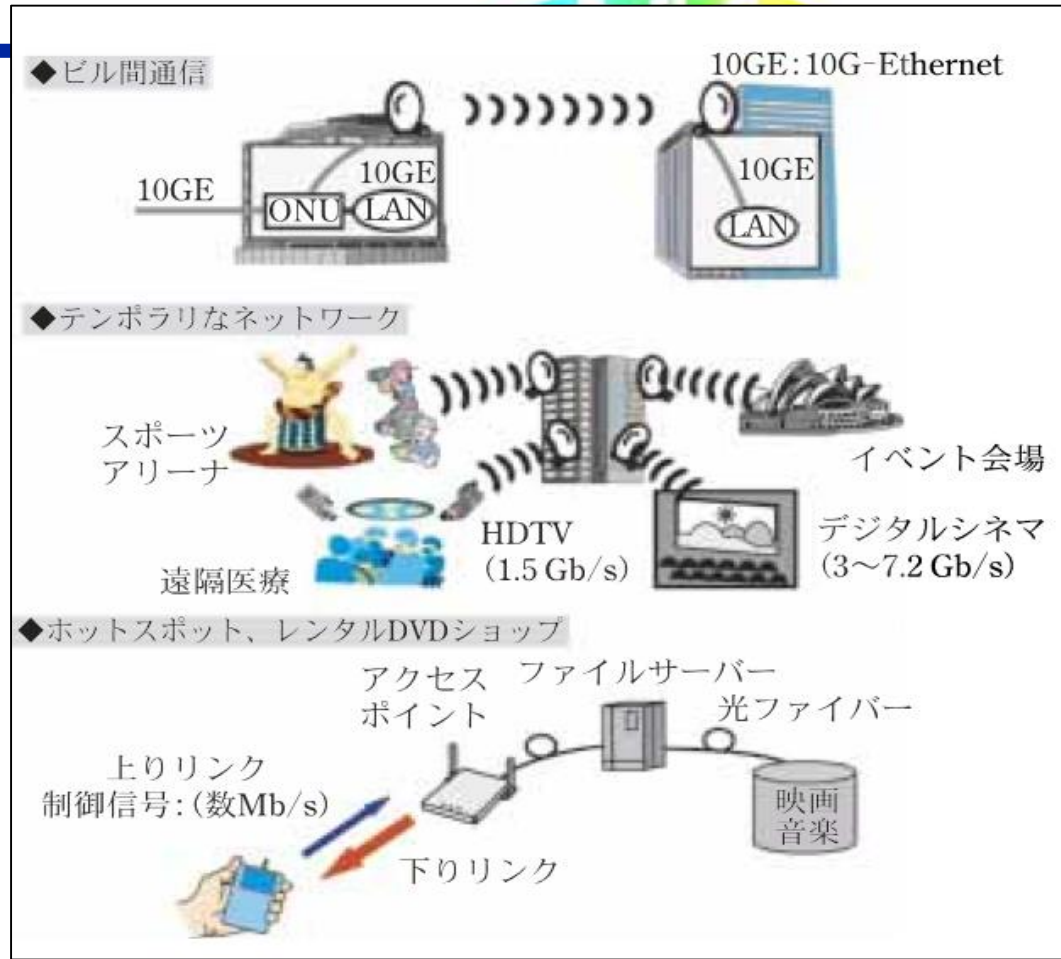
背景

THz無線通信 (大容量、高速)

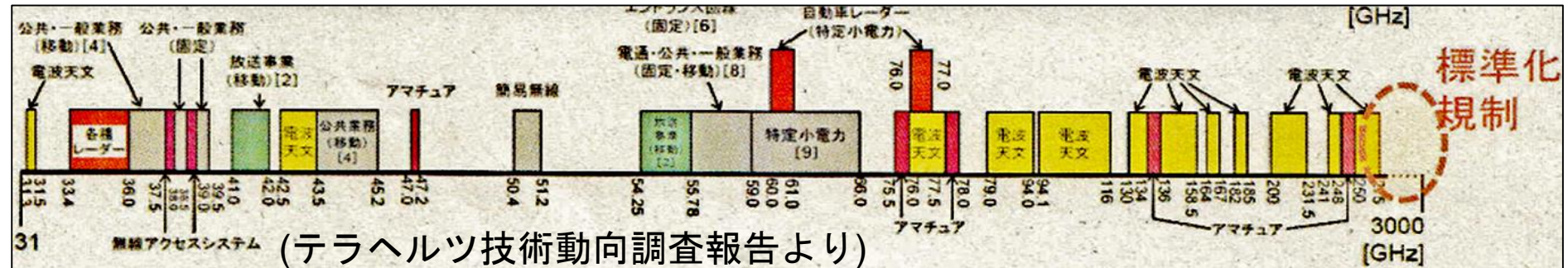
多数局間の混信を避ける
必要がある



THz領域において高精度な
周波数計測技術が必要

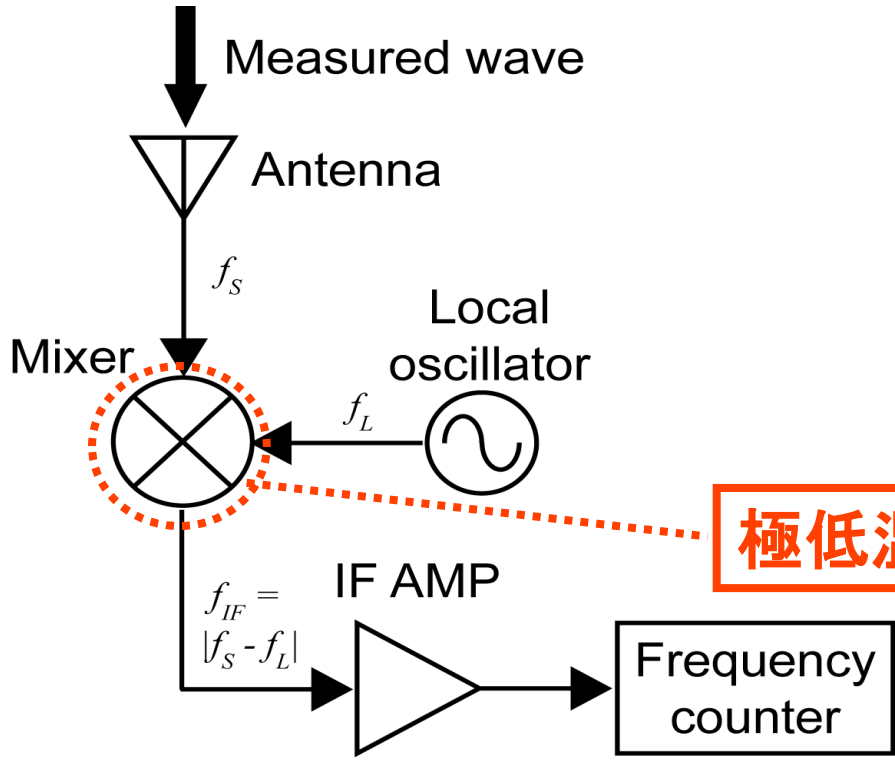


ref) <http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/THP/pdf/oyobuturi300.pdf>

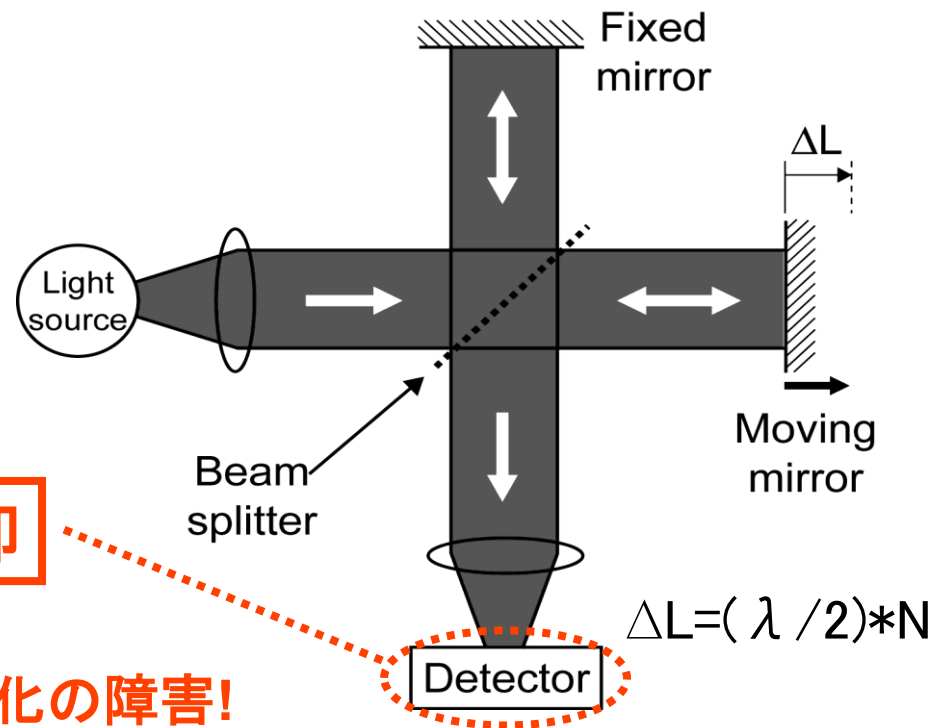


従来のTHz周波数計測技術

電氣的ヘテロダイン法



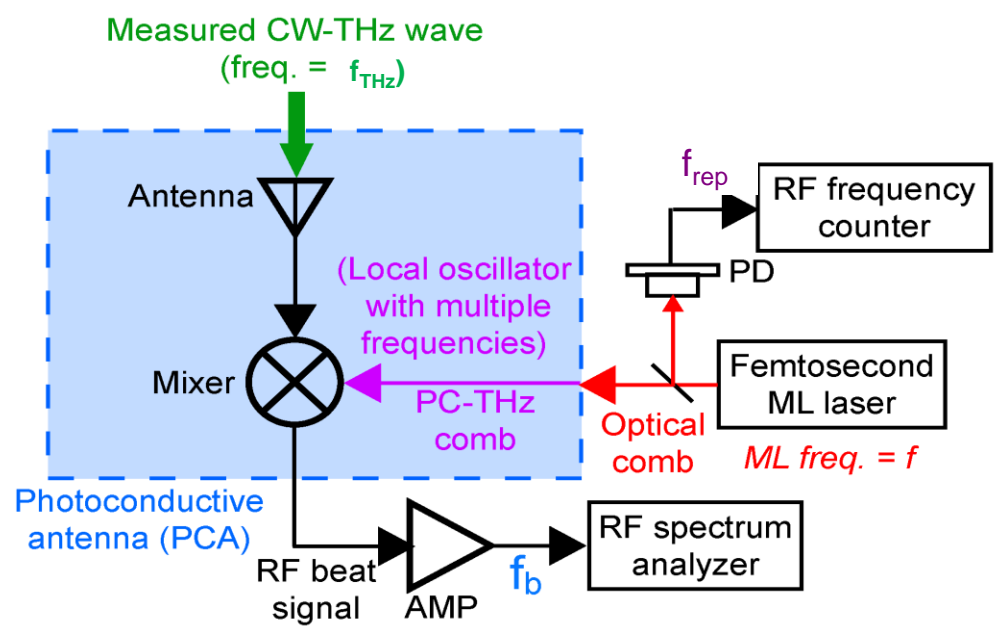
光学的手法 (干渉計測)



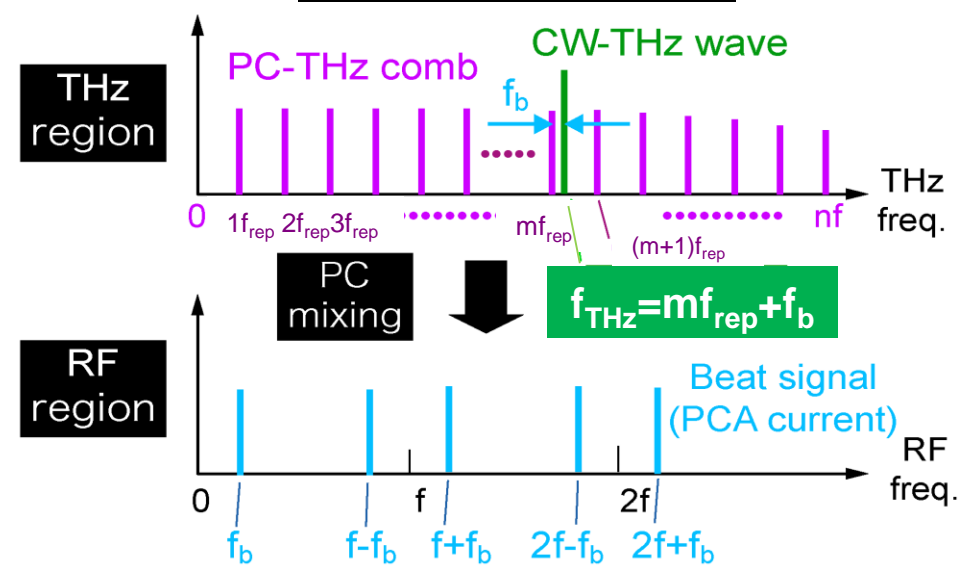
实用化の障害!

テラヘルツ領域 (0.1~10THz) をカバーすることは難しい
→THz領域をカバーできる新しい手法が必要!

光伝導ミキシング



Freq. domain



- ① PCAをヘテロダインレシーバーとして利用することにより、室温環境における高感度検出を実現
- ② PC-THzコムを多周波局部発振器として利用することにより、1台でTHz領域をフルカバー

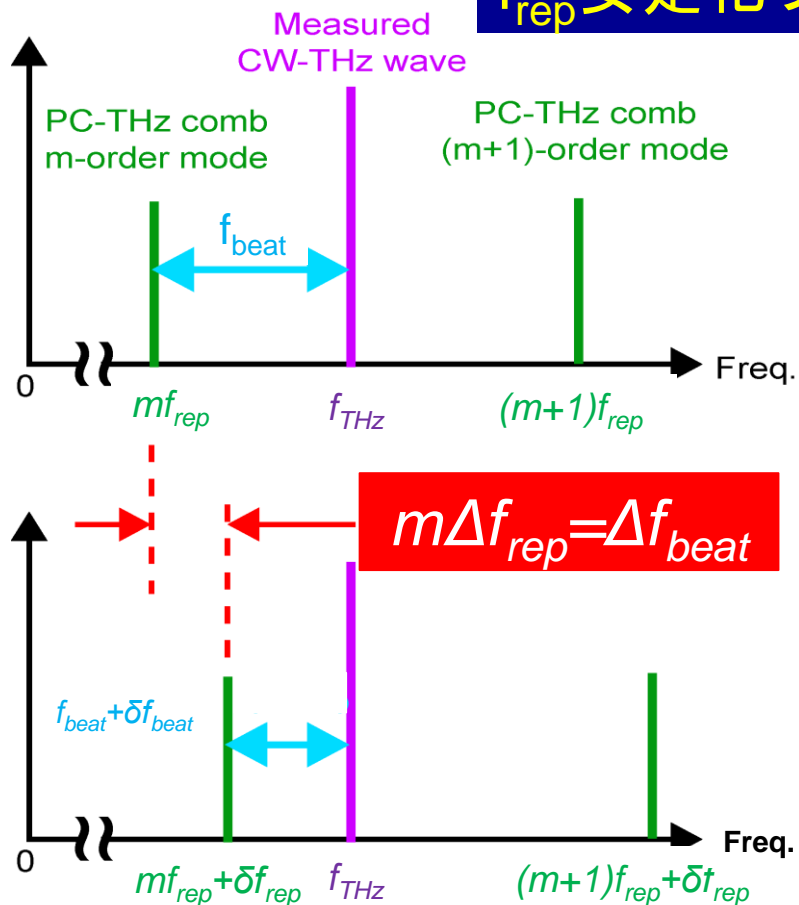
$$f_{THz} = mf_{rep} \pm f_{beat}$$

m : 最隣接コムモード次数
 f_{rep} : モード同期周波数
 f_{beat} : ビート周波数

Ref) Opt. Express **16**, 13052 (2008).
 Opt. Express **17**, 17034 (2009).

モード次数 m と f_b 符号の決定

f_{rep} 安定化フェムト秒レーザーの利用



Shift of ML freq. by Δf_{rep}
 $(f_{rep} \rightarrow f_{rep} + \Delta f_{rep})$

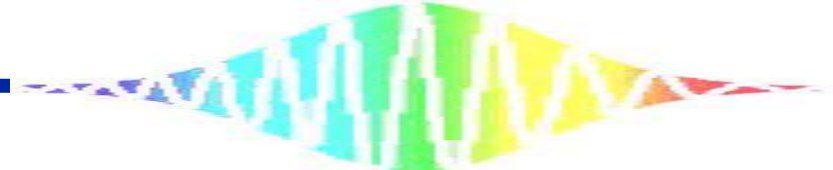
$$m = \frac{|\delta f_{beat}|}{|\delta f_{rep}|}$$

2ステップ計測
 (実時間で絶対周波数が決定できない!)

Change of beat freq. by Δf_b
 $(f_{beat} \rightarrow f_{beat} + \Delta f_{beat})$

$$f_{THz} = mf_{rep} - f_{beat} \quad (\delta f_{beat} / \delta f_{rep} > 0)$$

$$f_{THz} = mf_{rep} + f_{beat} \quad (\delta f_{beat} / \delta f_{rep} < 0)$$

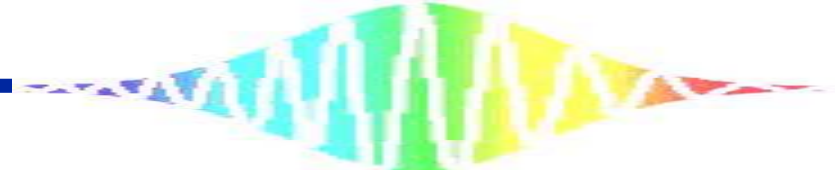


従来技術の問題点

- ① f_{rep} を安定化させたfsレーザーを用いる必要がある
- ② 2ステップ計測のため、リアルタイムでの計測ができない

研究目的

- 非制御フェムト秒レーザー利用による汎用性の向上
- 変動しているCW-THz波の絶対周波数をリアルタイム決定



これまでの計測手法

➤ 安定化デュアルTHzスペアナ

2台のレーザーが必要

レーザーの安定化が必要

➤ 非制御デュアルTHzスペアナ

レーザーの安定化不要

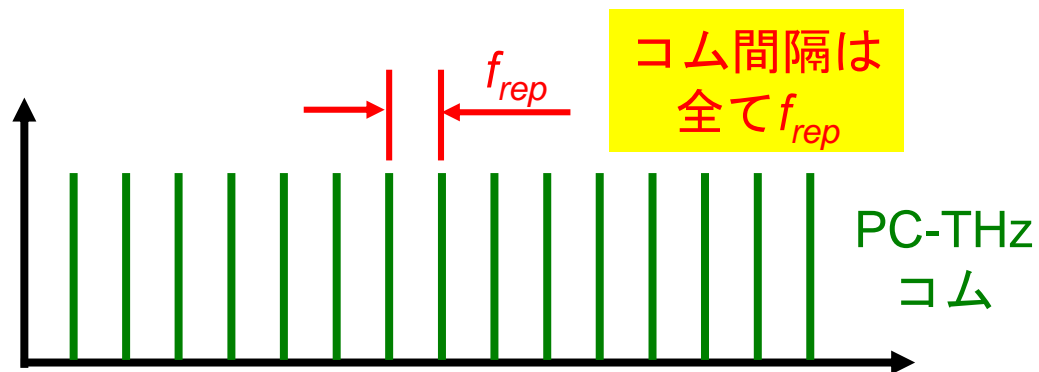
2台のレーザーが必要

➤ f_{rep} 変調シングルTHzスペアナ

1台のレーザーで可能

非制御であるが、 f_{rep} を変調しなければならない

PC-THzコムの常時等間隔性 (モード同期パルスの性質)



f_{rep} が揺らいでも
等間隔性は維持される

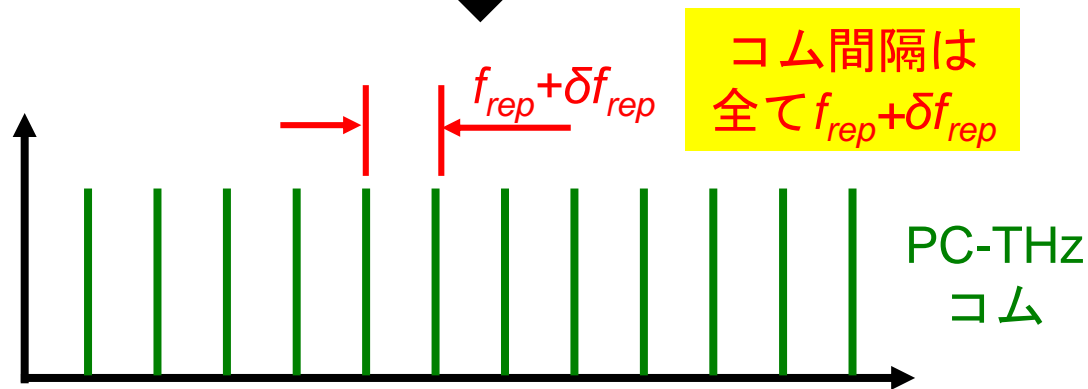


f_{rep} が外乱により
揺らぐ

**非
制
御**

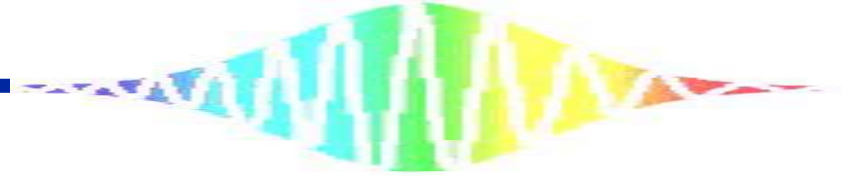
f_{rep} が揺らいでも
等間隔性は維持

f_{rep} を常時モニタリングす
れば、PC-THzコムは周波
数物差しとして利用可能



周波数安定化制御は必須
でない！一般に市販され
ている非制御レーザーも
利用可能！

PC-THzコムは常に等間隔のアコーディオン

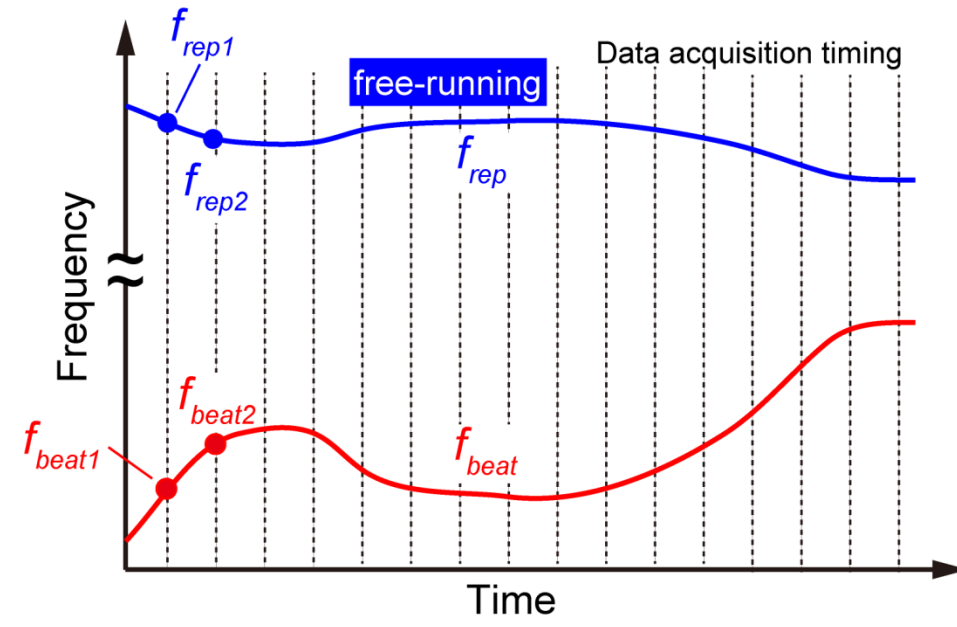
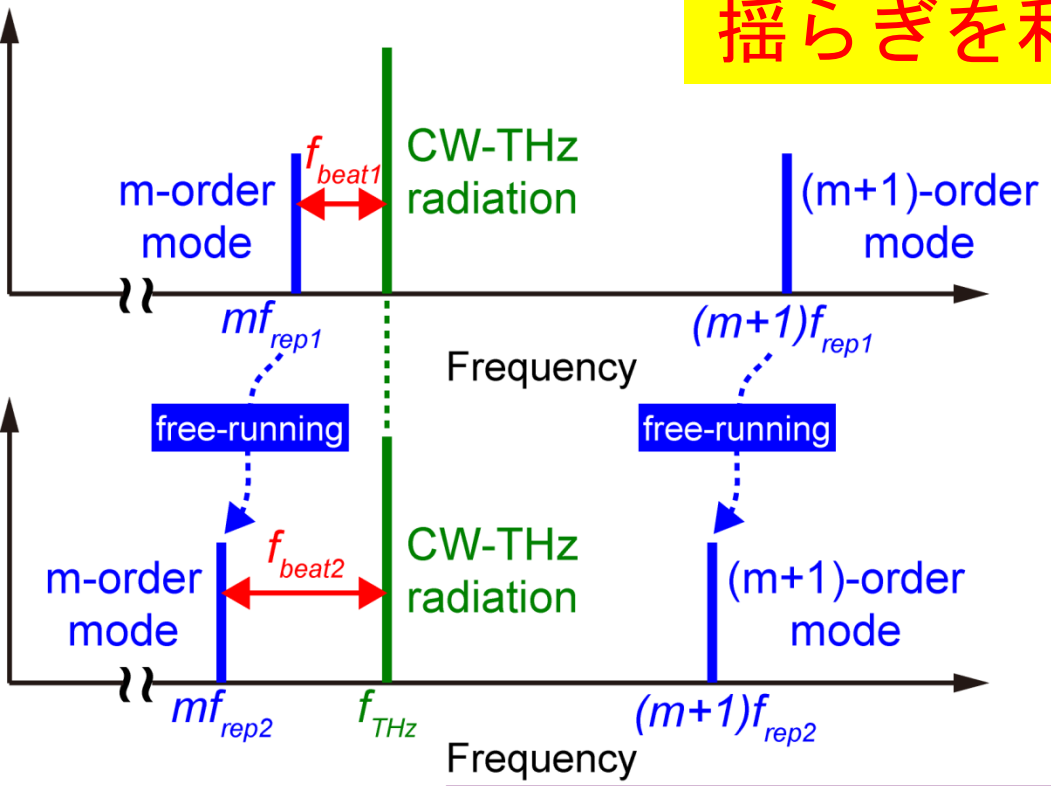


f_{rep} 非制御 PC-THz コム の 利用

測定原理

f_{rep} 自身の自然揺らぎを利用

$$m = \frac{|f_{beat2} - f_{beat1}|}{|f_{rep2} - f_{rep1}|}$$



$$f_{THz} = \frac{|f_{beat2} - f_{beat1}|}{|f_{rep2} - f_{rep1}|} f_{rep1} + f_{beat1} \quad \left\langle \frac{f_{beat2} - f_{beat1}}{f_{rep2} - f_{rep1}} < 0 \right\rangle$$

$$f_{THz} = \frac{|f_{beat2} - f_{beat1}|}{|f_{rep2} - f_{rep1}|} f_{rep1} - f_{beat1} \quad \left\langle \frac{f_{beat2} - f_{beat1}}{f_{rep2} - f_{rep1}} > 0 \right\rangle$$

実験装置



米IMRA

ファイバーレーザー
 $f_{rep} \approx 50,827,000 \text{ Hz}$
 $\lambda = 780\text{nm}, \Delta t = 100\text{fs}$

f_{rep} 非制御 PC-THz comb
(freq. = $f_{rep}, 2f_{rep}, \dots, mf_{rep}, \dots$)

出力周波数
100,030,560,000Hz

f_{rep} -free-running
Er-fiber laser

BS

L PCA

CW-THz radiation
(freq. = f_{THz})

Active frequency
multiplier chain

PD

$f_{rep}, 2f_{rep}, \dots, 15f_{rep}$

Local
oscillator
 f_{LO} M

AMP

AMP
帯域 : 10MHz
トランスインピーダンス
ゲイン : 100kV/A

Microwave frequency
synthesizer

Freq. ref.

LPF : 2MHz

$15f_{rep} - f_{LO}$

Freq. ref.

Digitizer

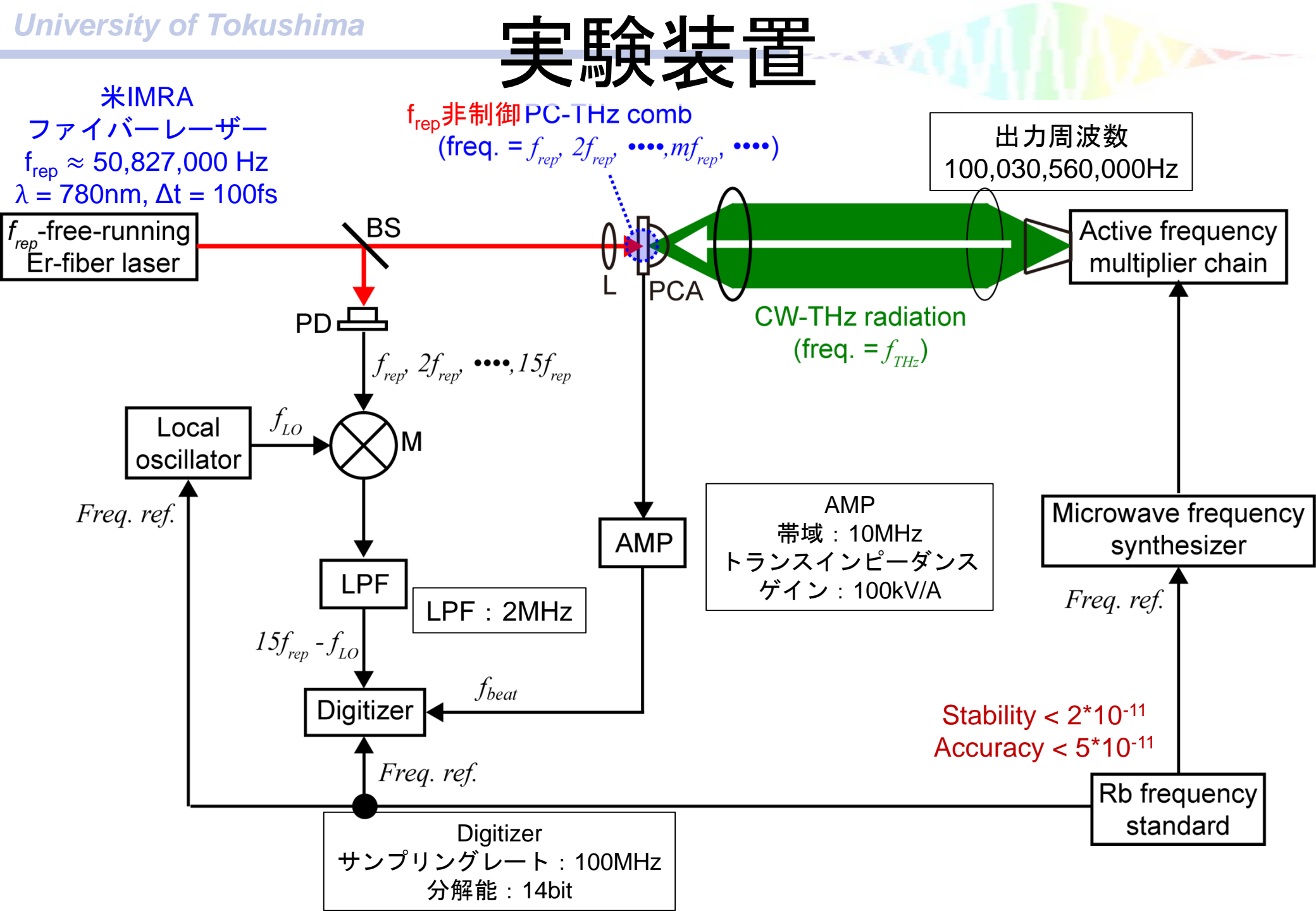
f_{beat}

Stability $< 2 \cdot 10^{-11}$
Accuracy $< 5 \cdot 10^{-11}$

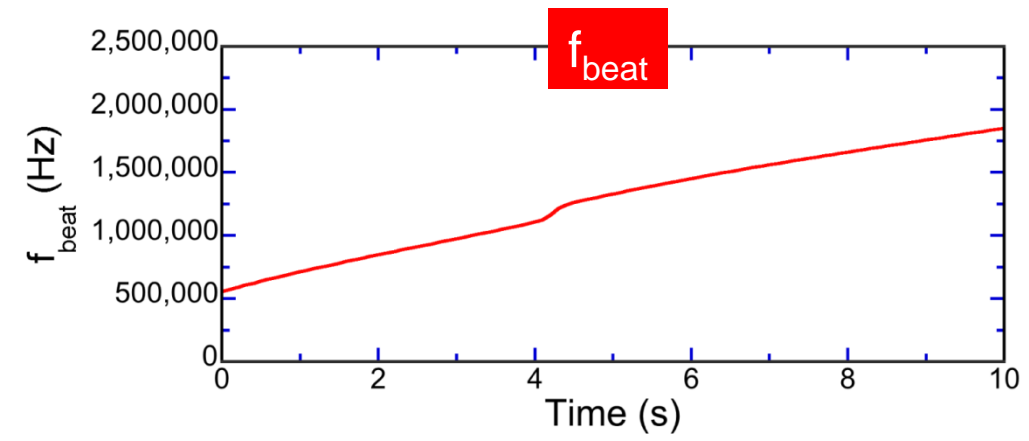
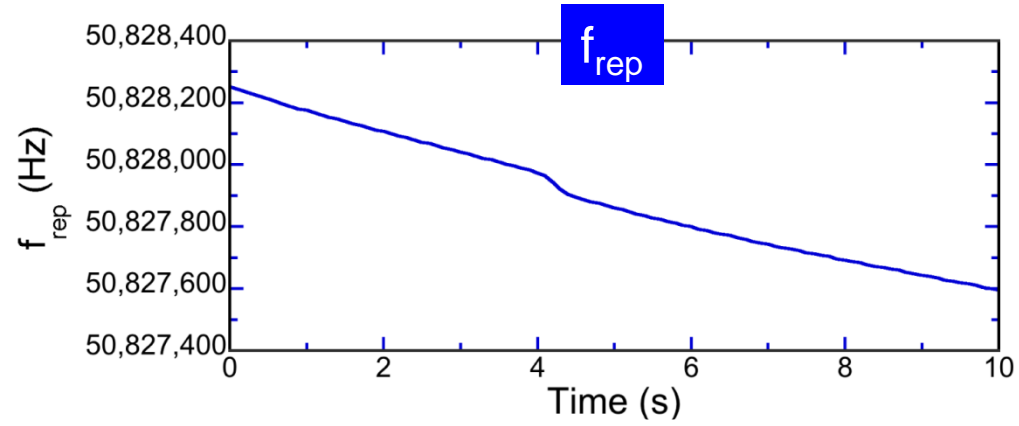
Freq. ref.

Rb frequency
standard

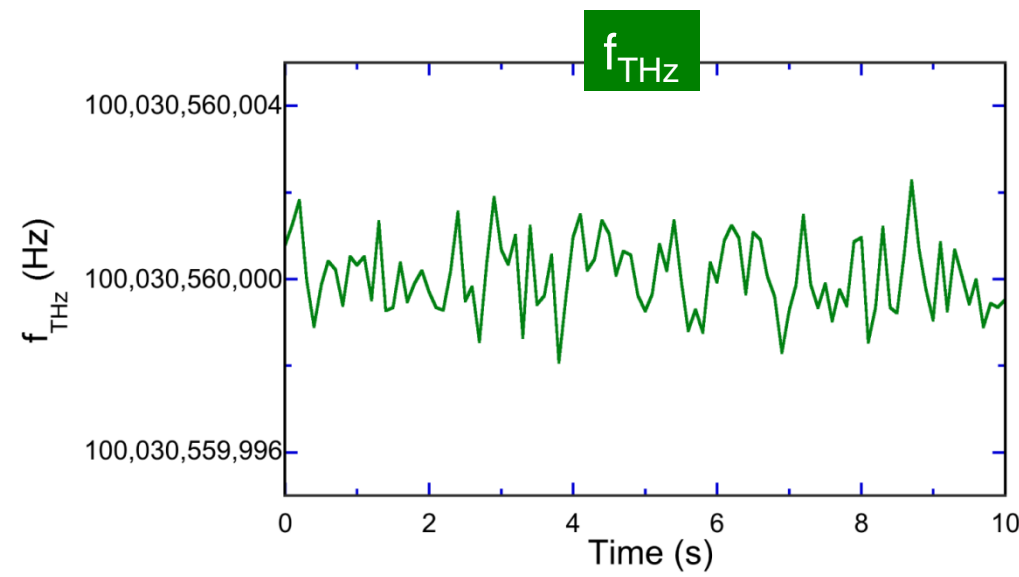
Digitizer
サンプリングレート : 100MHz
分解能 : 14bit



絶対周波数のリアルタイム決定

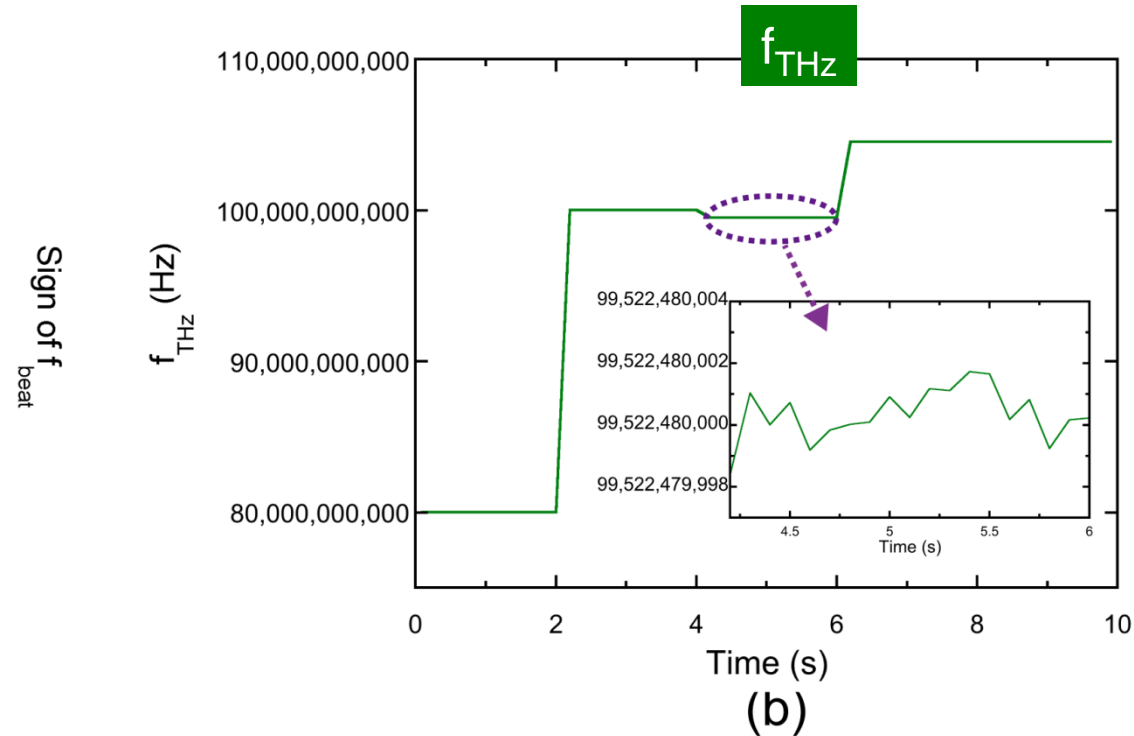
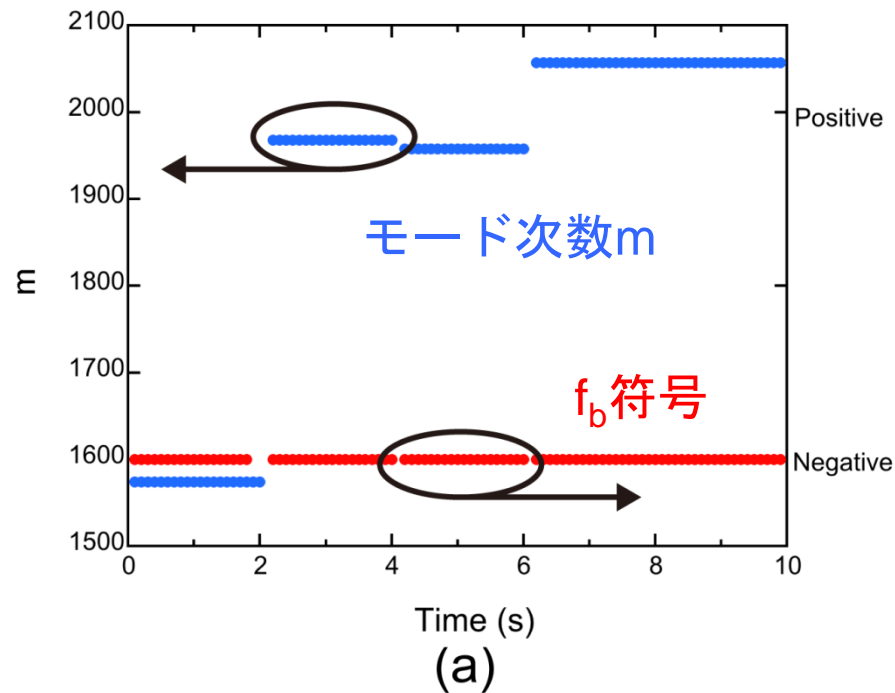


$$m = \frac{|f_{beat2} - f_{beat1}|}{|f_{rep2} - f_{rep1}|} = 1968$$

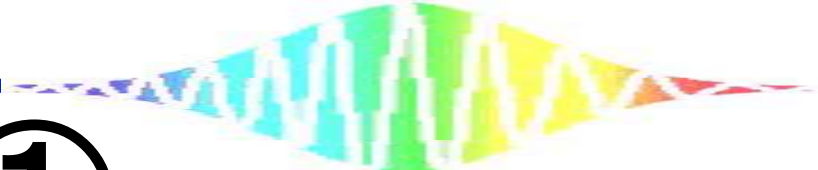


絶対周波数確度 5.0×10^{-11}
(相対周波数確度 8.2×10^{-13}
@測定レート 10Hz)

CW-THz波のステップ周波数チューニング (周波数変動 = +20 GHz, -500 MHz, +5 GHz)



CW-THz光源の大きな周波数変動 (モードホップなど) もリアルタイムにモニタリングすることが可能!



まとめ①

	相対周波数確度	サンプリング レート	安定化 制御	レーザー台 数
2ステップ型 安定化シングルPC- THzコム	2.8×10^{-11}	0.1 Hz	必要	1台
安定化デュアルPC- THzコム	8.9×10^{-12}	100 Hz	必要	2台
非制御デュアルPC- THzコム	4.0×10^{-11}	100 Hz	不要	2台
変調非制御シング ルPC-THzコム	4.0×10^{-14}	10 Hz	不要	1台
非制御シングル PC-THzコム	8.2×10^{-13}	10 Hz	不要	1台

まとめ②

- ✓ f_{rep} **変調** PC-THzコムを用いて、CW-THz波の絶対周波数決定を決定
(相対周波数確度 4.0×10^{-14} @ 測定レート 10Hz)
(200MHz 間隔のステップチューニング)
- ✓ f_{rep} **非制御** PC-THzコムを用いて、CW-THz波の絶対周波数決定を決定
(相対周波数確度 8.2×10^{-13} @ 測定レート 10Hz)
(20GHz のモードホップにも対応可能)