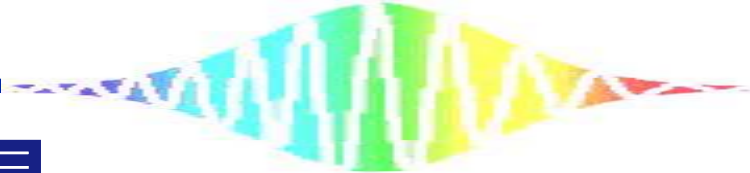


13aB2

デュアル・テラヘルツ・コムを用いた連続発振テラヘルツ波のリアルタイム絶対周波数計測

○林建太¹⁾, 横山修子²⁾, 稲場肇³⁾, 美濃島薫⁴⁾, 安井武史¹⁾

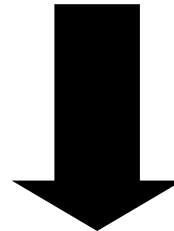
1)徳島大学, 2)日本マイクロ光器,
3)産業技術総合研究所, 4)電気通信大学



研究背景

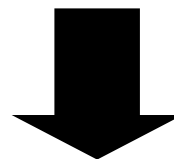
周波数は電磁波の基本的な物理量である

THz無線通信等の
様々なTHzのアプリが確立

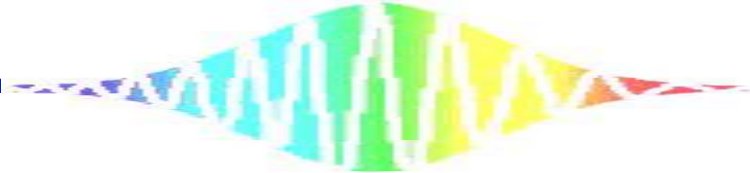


実用的なCW-THz 光源
(THz-QCL, UTC-PDなど)
の発達

高精度なCW-THz波の周波数計測が
必要になる!

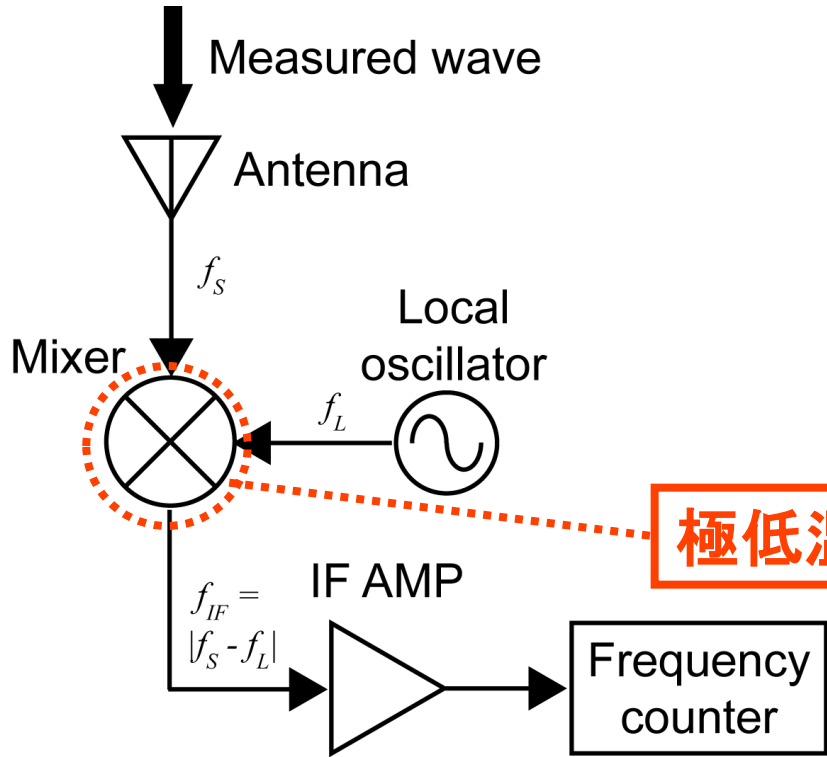


しかしながら、CW-THz波の絶対周波数計測は
十分に確立していない!

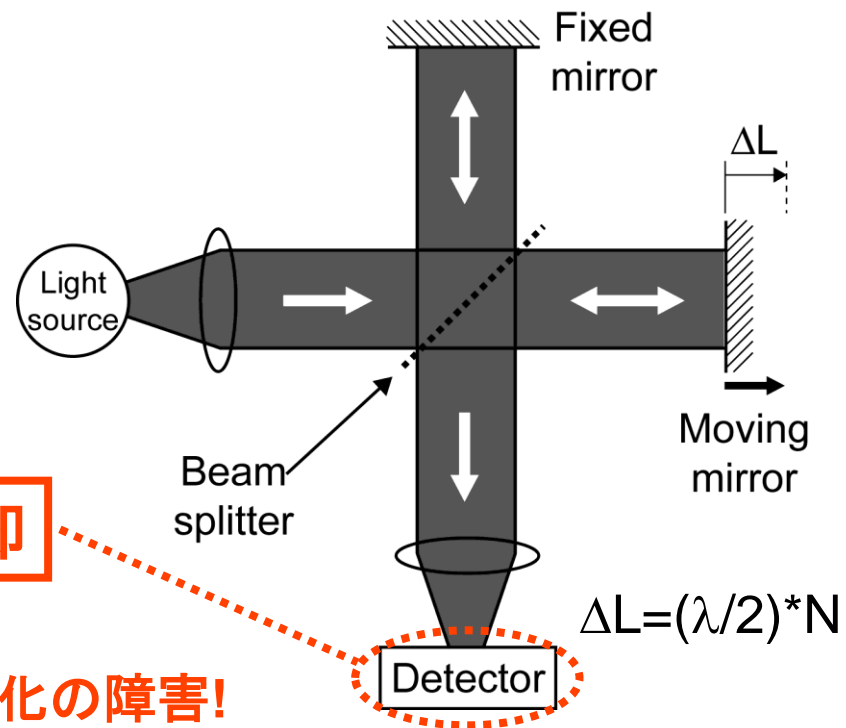


従来法

電氣的へテロダイン法



光學的手法 (干渉計測)

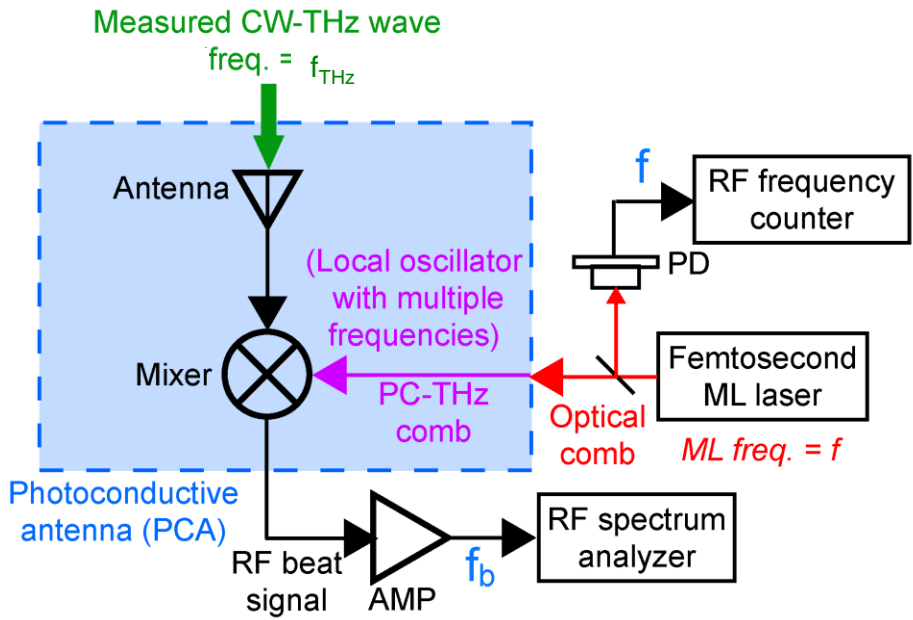


極低温冷却

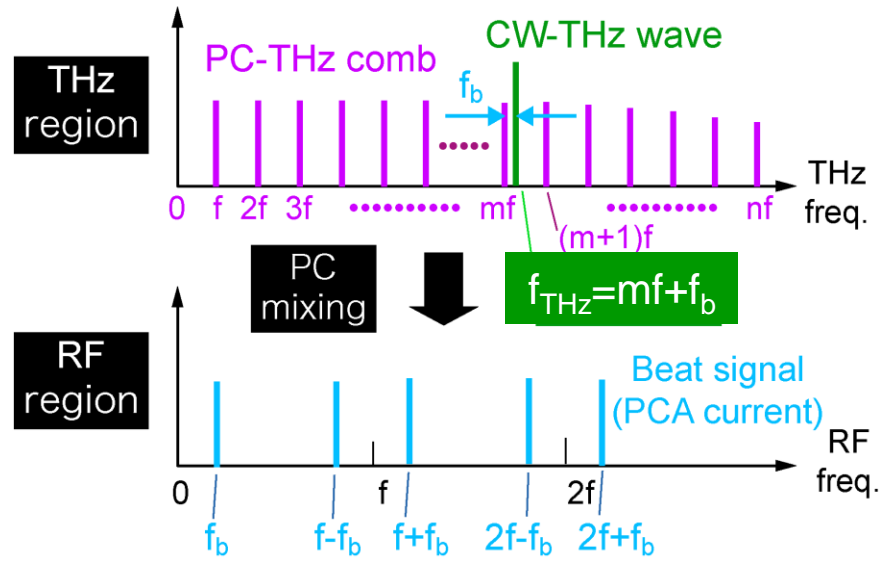
実用化の障害!

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!

光伝導ミキシング法を用いた THzコム参照型スペクトラム・アナライザー



Freq. domain

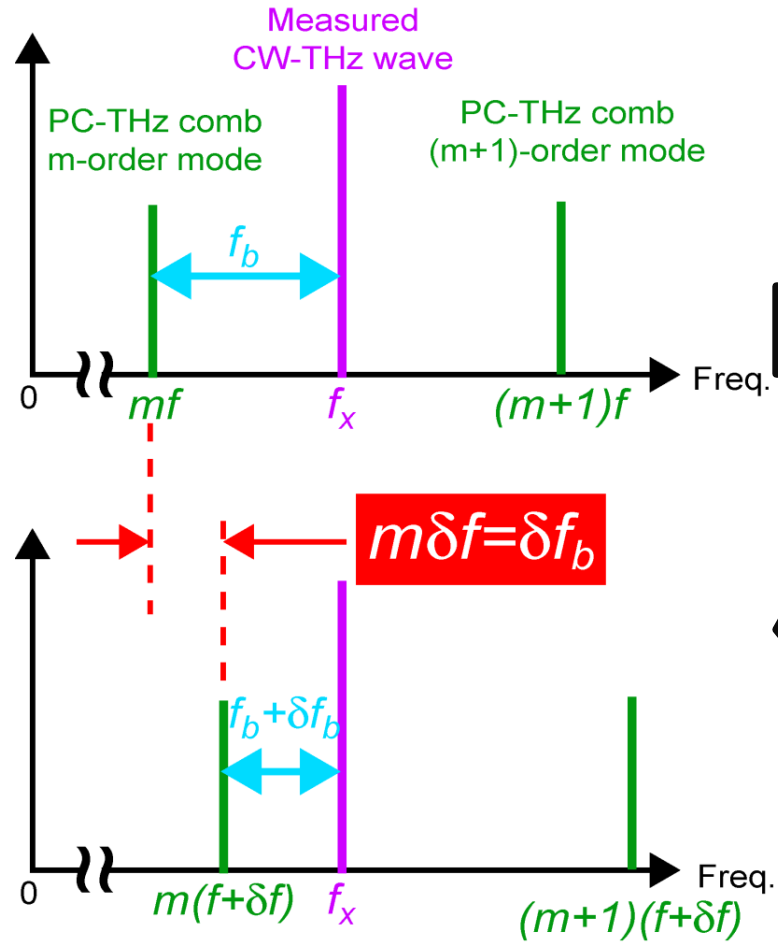


$f_{THz} = mf \pm f_b$

m: コムの次数
f: モード同期周波数
f_b: ビート周波数

Ref) S. Yokoyama et al, *Opt. Express* **16**, 13052-13061 (2008).
 T. Yasui et al. *Opt. Express* **17**, 17034-17043 (2009).

次数mと符号の決定方法



モード同期周波数を δf だけ変化
($f \rightarrow f + \delta f$)

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|}$$

ビート周波数も δf_b 変化
($f_b \rightarrow f_b + \delta f_b$)

$$f_{THz} = mf_{rep1} - f_{beat1} \quad (\delta f_b / \delta f > 0)$$

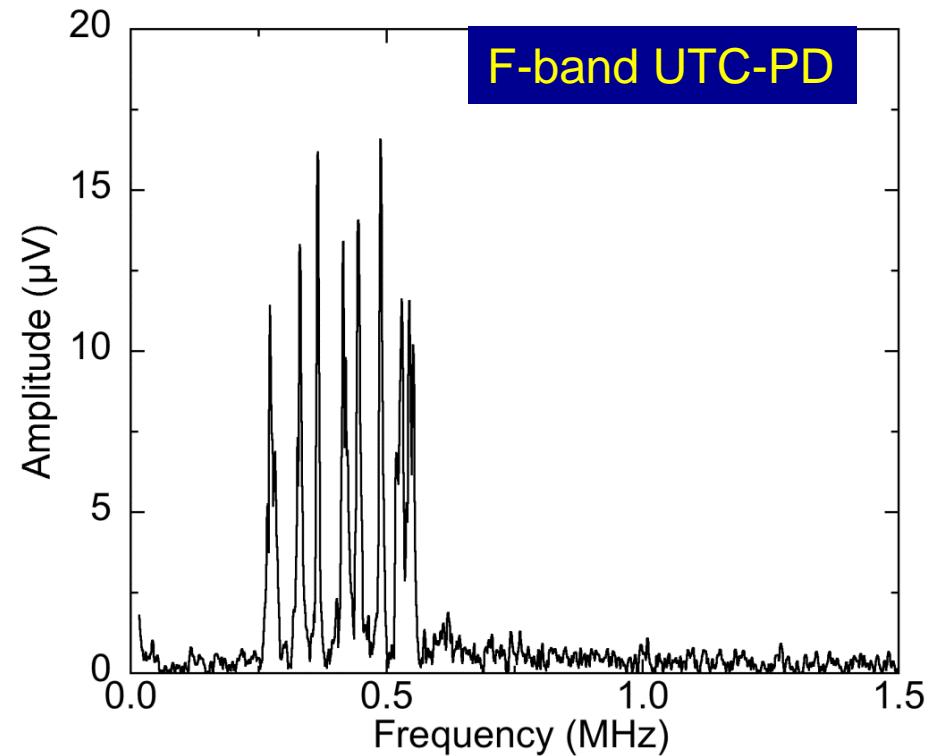
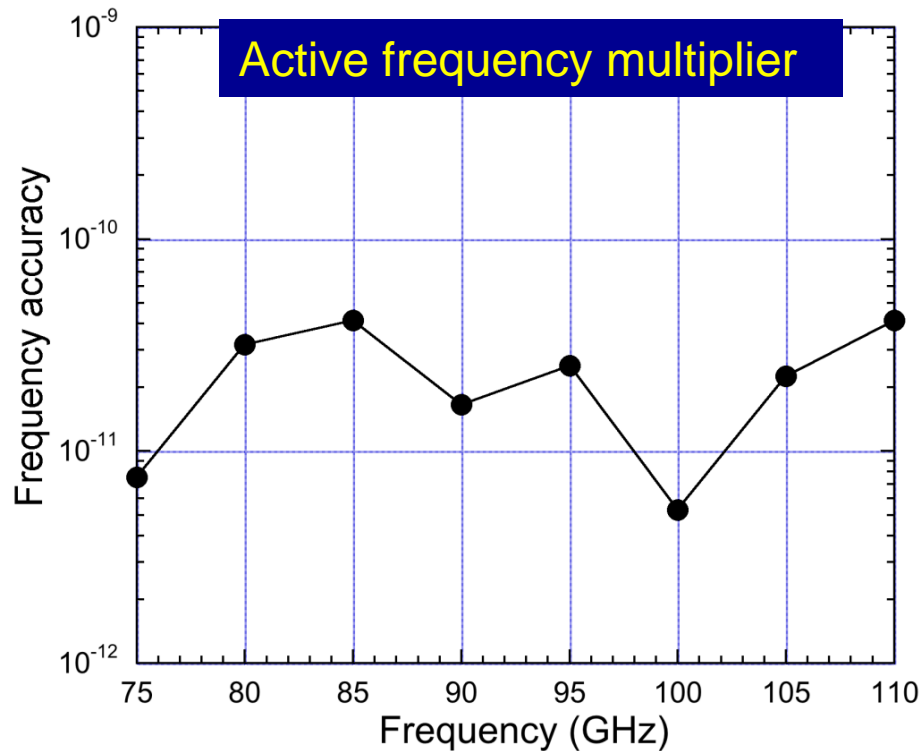
$$f_{THz} = mf_{rep1} + f_{beat1} \quad (\delta f_b / \delta f < 0)$$

従来研究

Ref) T. Yasui et al. *Opt. Express* 17, 17034-17043 (2009).

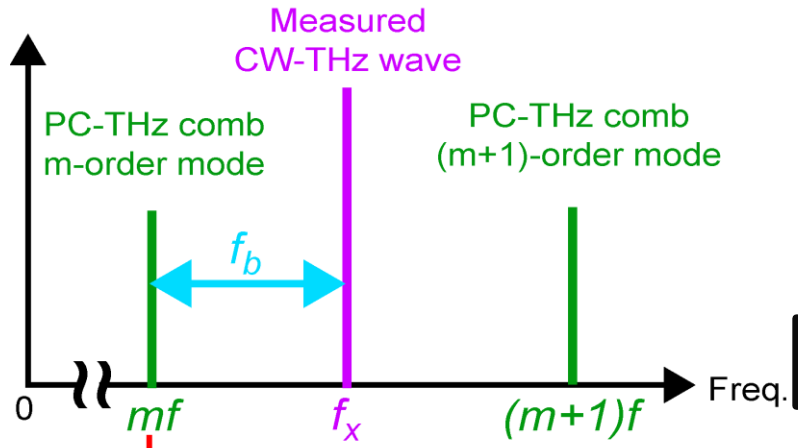
絶対周波数計測

ビート信号のリアルタイムモニタリング



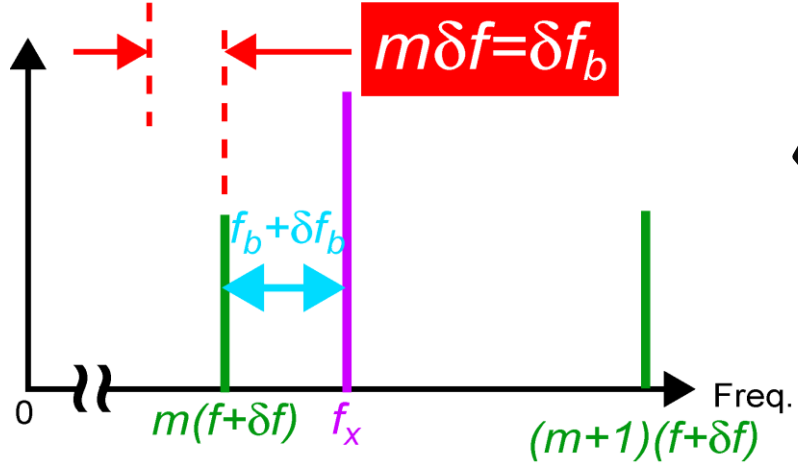


従来のTHzスペアナの問題点



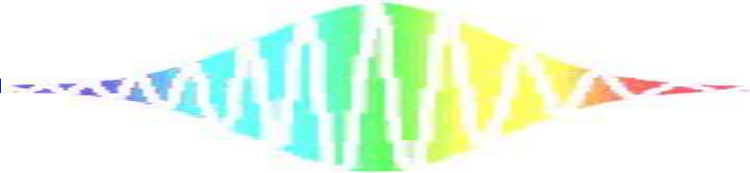
モード同期周波数を δf だけ変化
($f \rightarrow f + \delta f$)

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|}$$




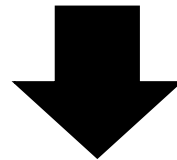
ビート周波数も δf_b 変化
($f_b \rightarrow f_b + \delta f_b$)

モード同期周波数を変化させる前と後の
2ステップの計測が必要！



従来研究における問題点

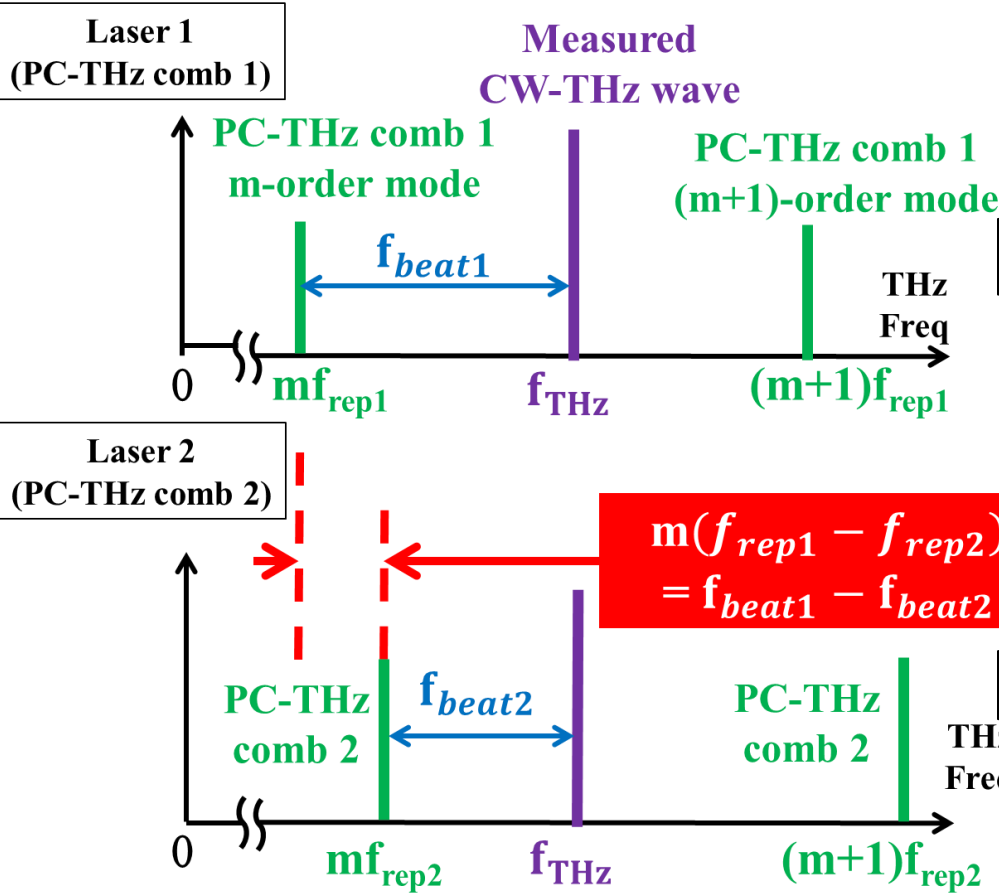
絶対周波数を決定するためのビート周波数計測が2ステップである  **リアルタイムではない!**



今回の研究

- デュアルPC-THzコムを用いることで、絶対周波数を**リアルタイムで決定する**
- さらに、ヒルベルト変換を用いて瞬時周波数を算出することで、**絶対周波数を高精度に取得する**

リアルタイムでの絶対周波数の決定法

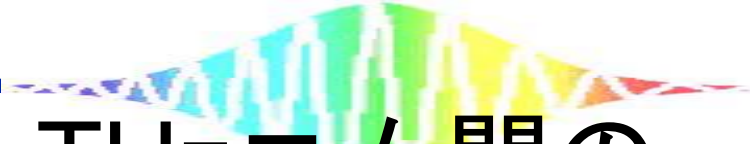


デュアルPC-THzコムを用いた並列計測！

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

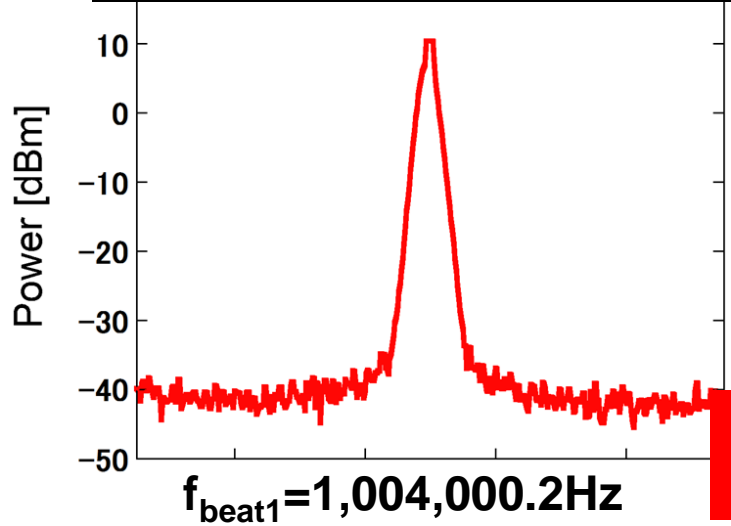
$$f_{THz} = mf_{rep1} - f_{beat1} \quad (f_{beat1} - f_{beat2} / f_{rep1} - f_{rep2} > 0)$$

$$f_{THz} = mf_{rep1} + f_{beat1} \quad (f_{beat1} - f_{beat2} / f_{rep1} - f_{rep2} < 0)$$

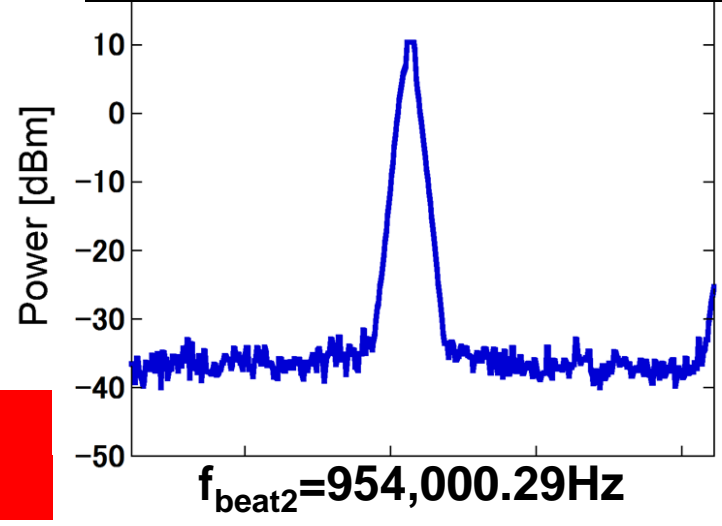


CW-THz波と2つのPC-THzコム間のビート信号

PC-THzコム (1)
($f_{rep1} = 100,000,000$ Hz)
@安定化制御



PC-THzコム (2)
($f_{rep2} = 100,000,050$ Hz)
@安定化制御



リアルタイム ↓ で決定出来る!

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

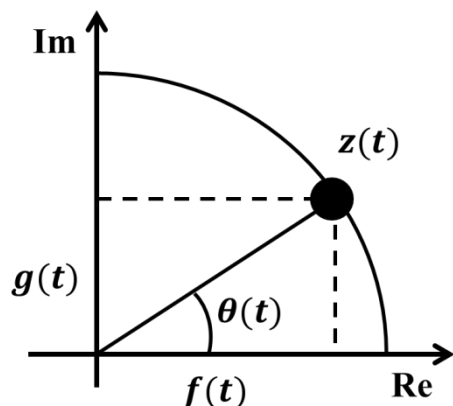
$$= \frac{|1,004,000.2 - 954,000.29|}{|100,000,000 - 100,000,050|} = 1000$$

$$f_{THz} = m f_{rep1} + f_{beat1} = 1000 * 100,000,000 + 1,004,000.2 = 100,001,004,000 \text{ Hz}$$

ヒルベルト変換を用いた瞬時周波数計測

Ref) H. Fuser et al, Appl. Phys. Lett. **99**, 121111 (2011).

ヒルベルト変換とは, 実領域の測定信号を複素信号に変換する操作



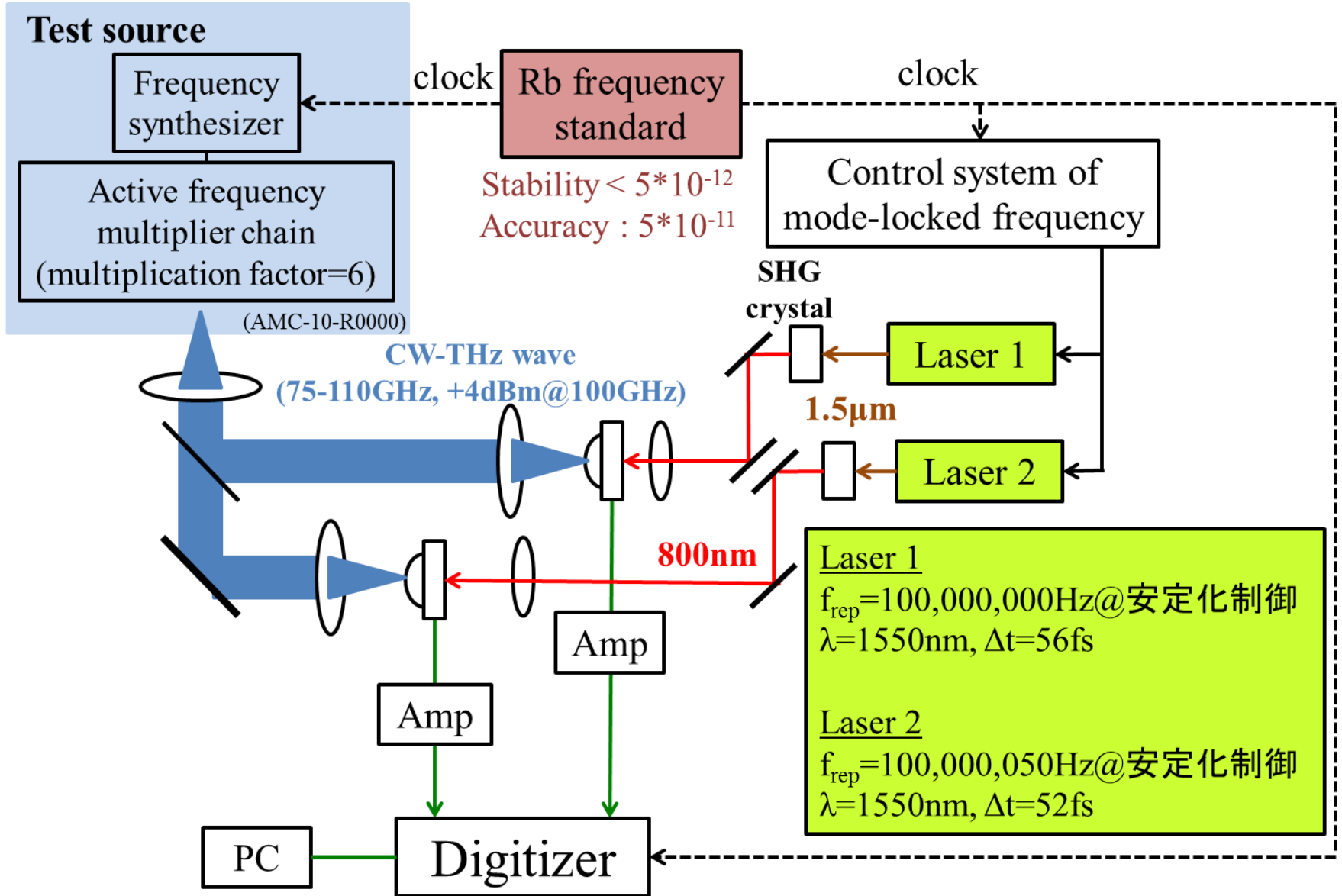
$z(t) = f(t) + ig(t)$ と表される

$$\theta(t) = \arg[z(t)] = \tan^{-1} \left[\frac{g(t)}{f(t)} \right]$$

$$f_{b,i} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\theta(t)}{dt}$$

これにより求まる瞬時位相を微分することで、瞬時周波数を算出することが出来る!

実験セットアップ





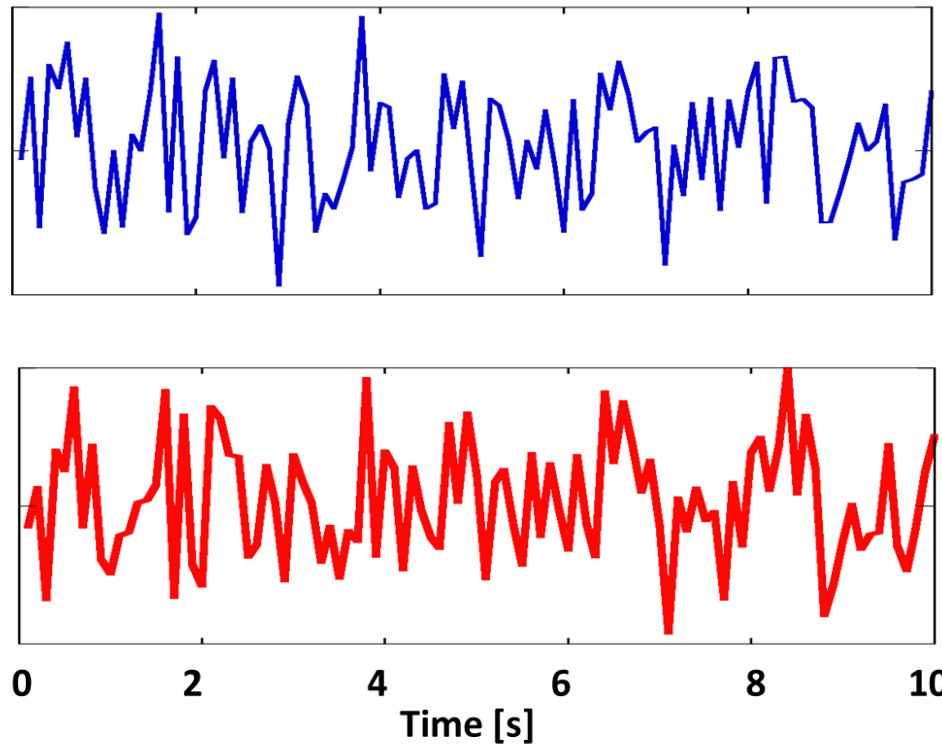
ビート周波数とCW-THz波の測定結果

f_{beat1}

デジタルの
サンプリングレート
10MHz

f_{beat2}

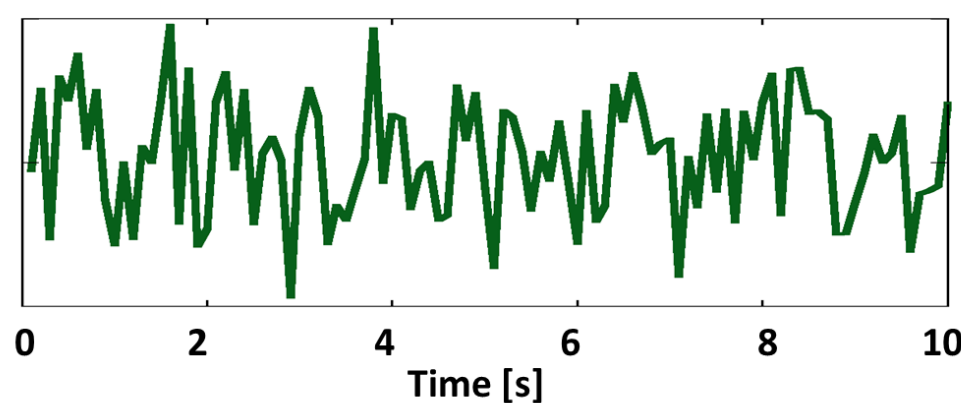
Instantaneous
Frequency [Hz]
Instantaneous
Frequency [Hz]
Instantaneous
Frequency [Hz]



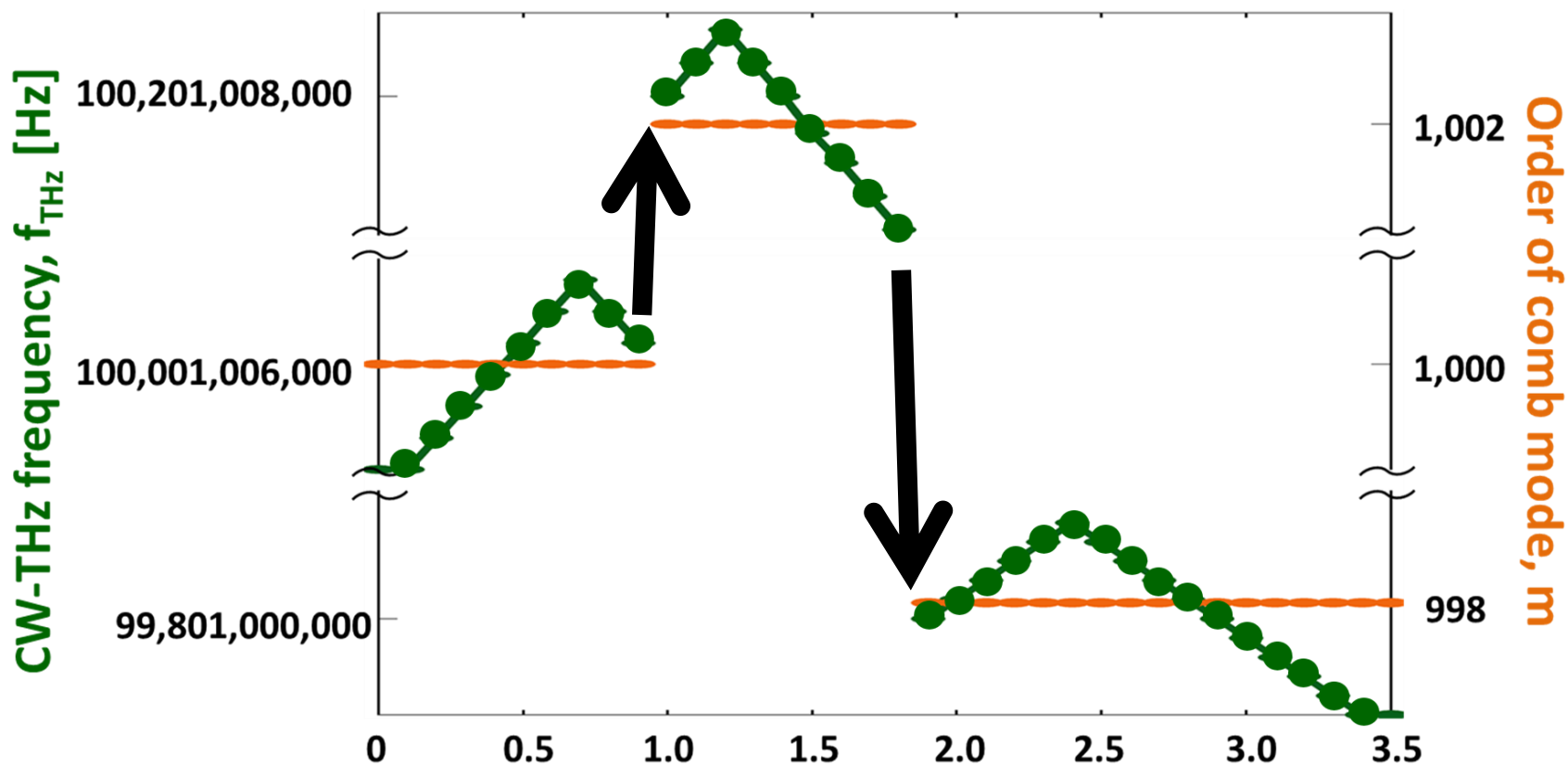
- 実験条件
- ・ 100ms計測
 - ・ 積算100

f_{THz}

Instantaneous
Frequency [Hz]
Instantaneous
Frequency [Hz]
Instantaneous
Frequency [Hz]

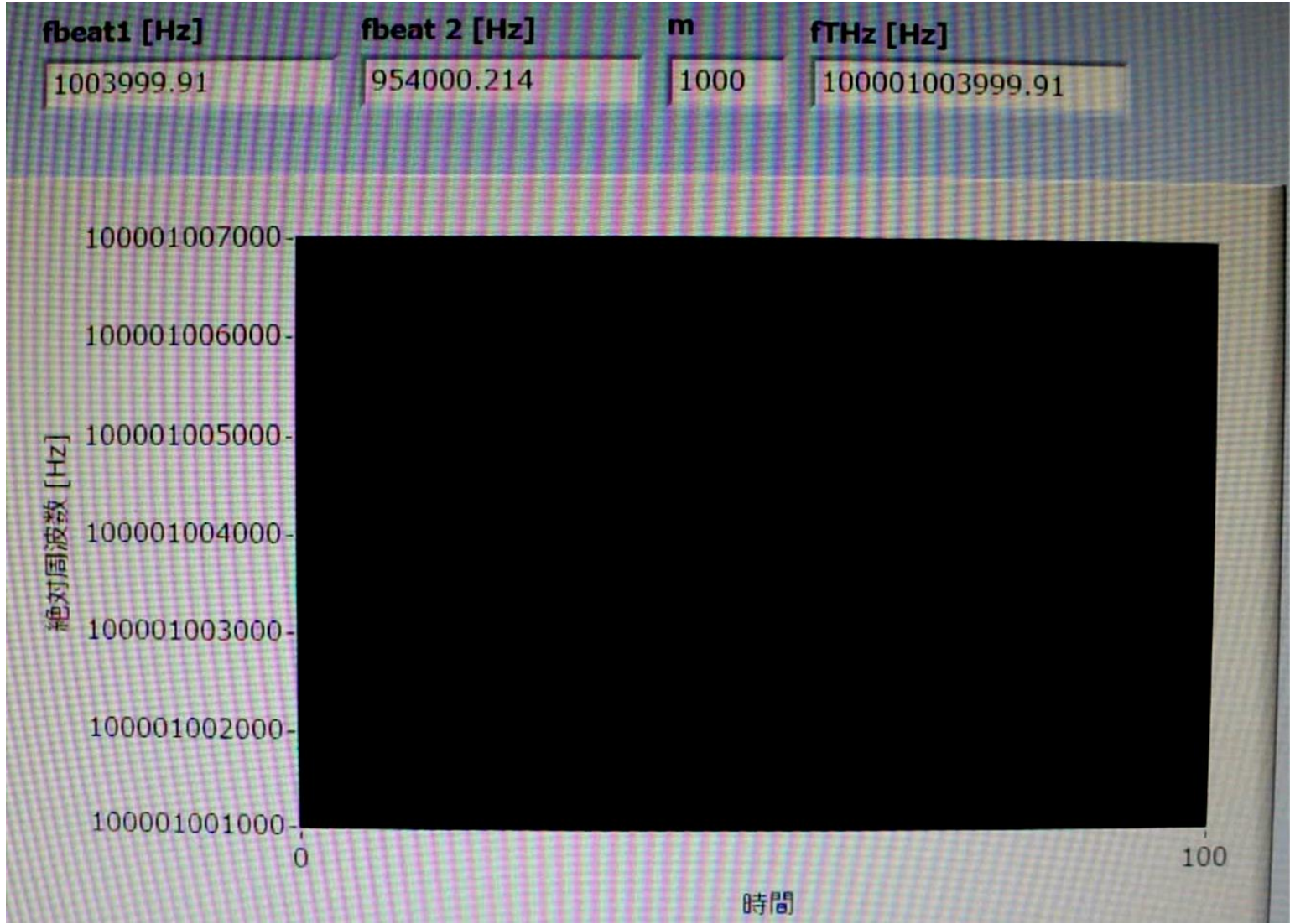


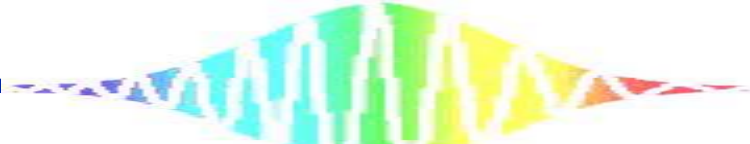
瞬時周波数を用いたCW-THz波のリアルタイム計測



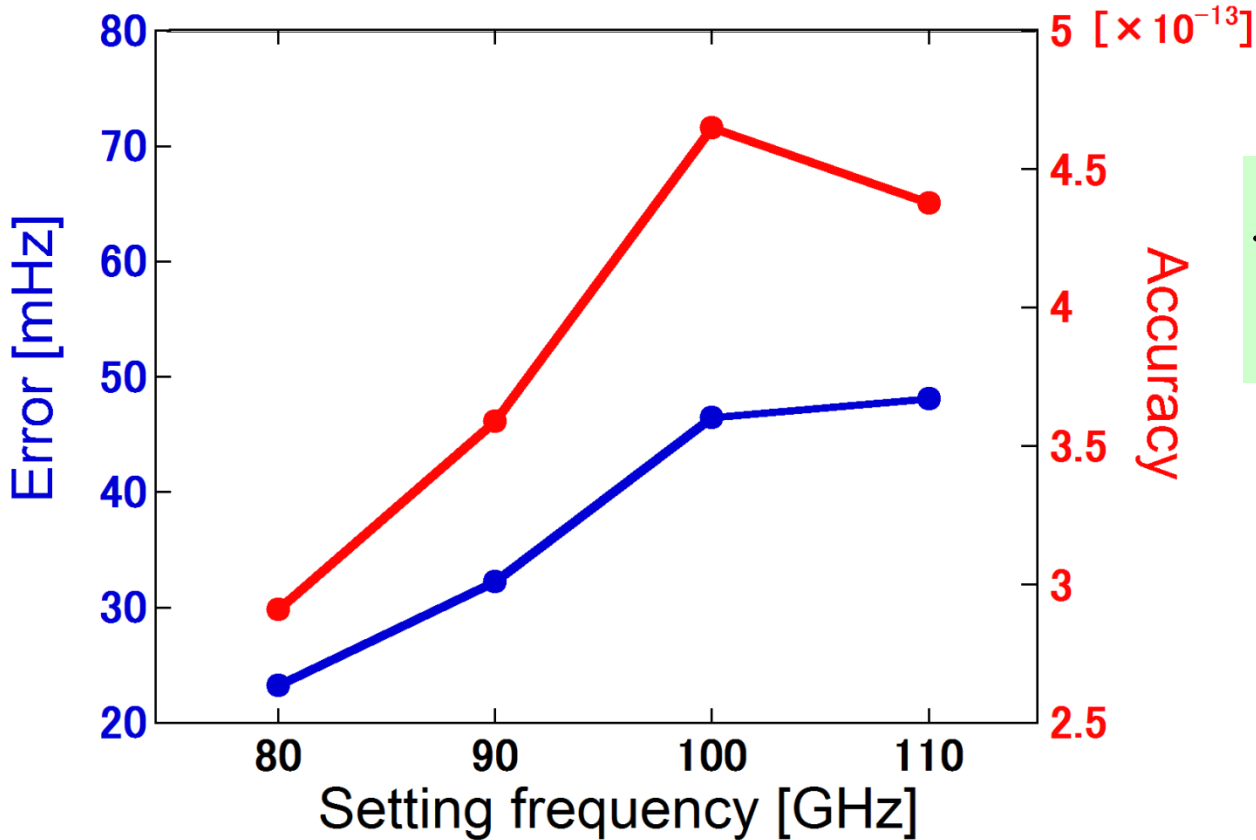
次数が変わるようなCW-THz波の変化もリアルタイムで計測可能!

瞬時周波数を用いたCW-THz波のリアルタイムモニタリング





絶対周波数計測の実験精度



測定誤差の見積もり

$$f_{THz} = mf_{rep1} + f_{beat1}$$

$$Df_{THz} = mDf_{rep1} + Df_{beat1}$$

$$\Delta f_{rep1} = 120\mu\text{Hz}$$

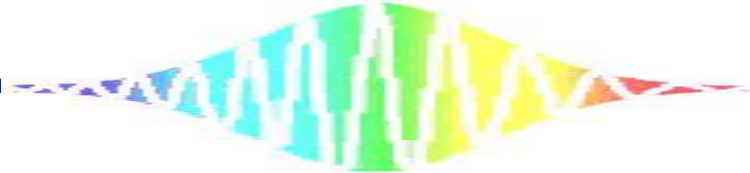
$$\Delta f_{beat1} = 21\text{mHz}$$

$$m = 800 \sim 1100$$



$$\Delta f_{THz} = 117 \sim 153\text{mHz}$$

本実験での平均精度 = 3.9×10^{-13}

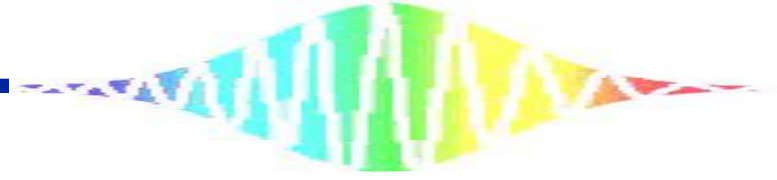


まとめ

デュアルPC-THzコムと瞬時周波数を用いることで、リアルタイムで高速な絶対周波数計測を実現

今後の予定

- ・一つのPC-THzコムを用いて絶対周波数をリアルタイムに決定する
- ・PCAに1.5 μ mファイバーレーザーを直接カップリングすることで、コンパクトで持ち運び出来る装置を目指す

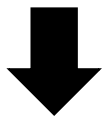


背景

近年、テラヘルツ (THz) 波が大容量無線通信のための新しい手段として注目

- THz無線通信など

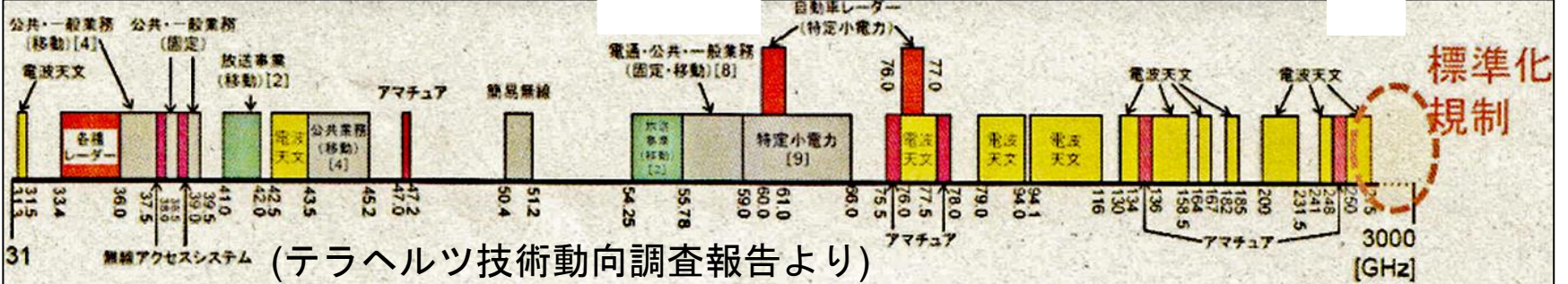
**多数局間の混信を避ける
必要がある**



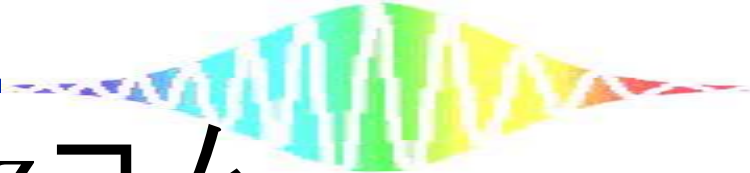
**THz領域において高精度な
周波数計測技術が必要**



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



(テラヘルツ技術動向調査報告より)

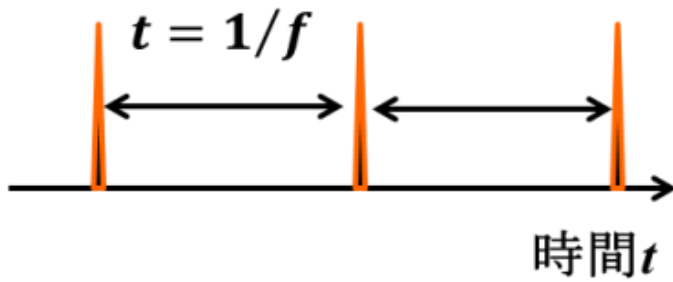


光コムとTHzコム

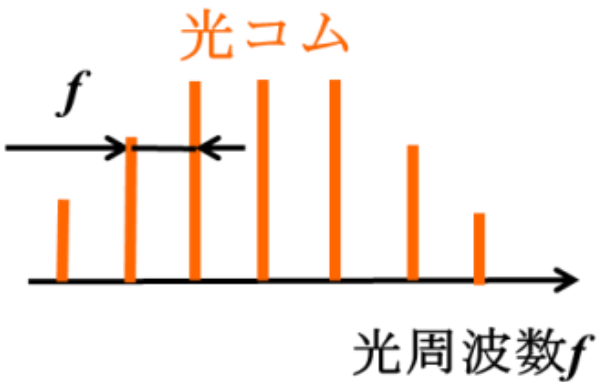
時間領域

周波数領域

モード同期超短パルス列

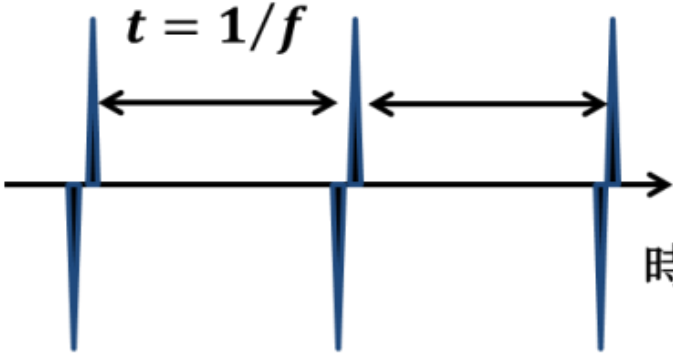


フーリエ変換



THz検出用PCAに入射すると

ピコ秒モード同期パルス列



フーリエ変換

