

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

安井研究室 M1 林建太

テラヘルツ無線通信

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



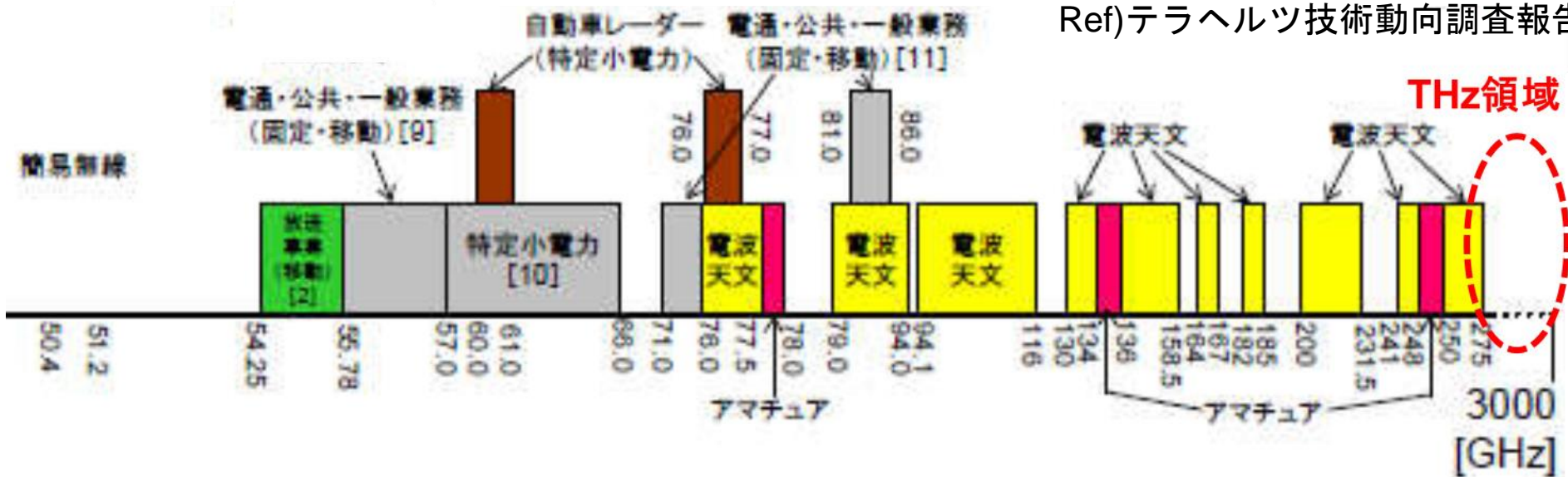
テンポラリーな回線や
災害・緊急時のバック
アップ回線



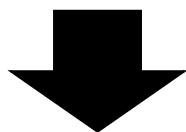
ホットスポットなどでの
非接触瞬時データ転送

無線通信の周波数割り当て状況

Ref) テラヘルツ技術動向調査報告



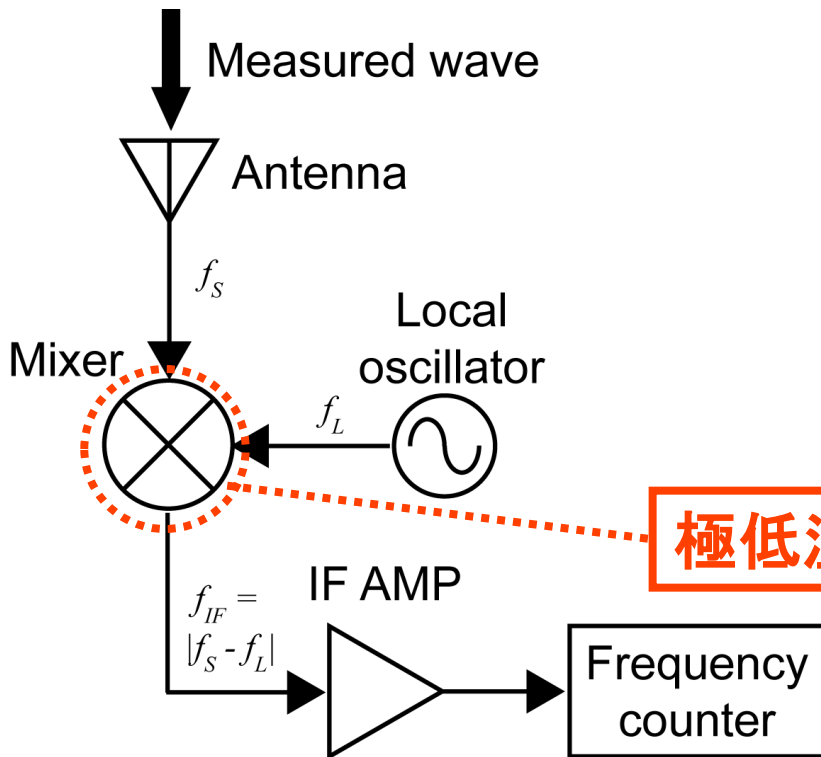
THz帯における周波数計測技術は
十分に確立していない



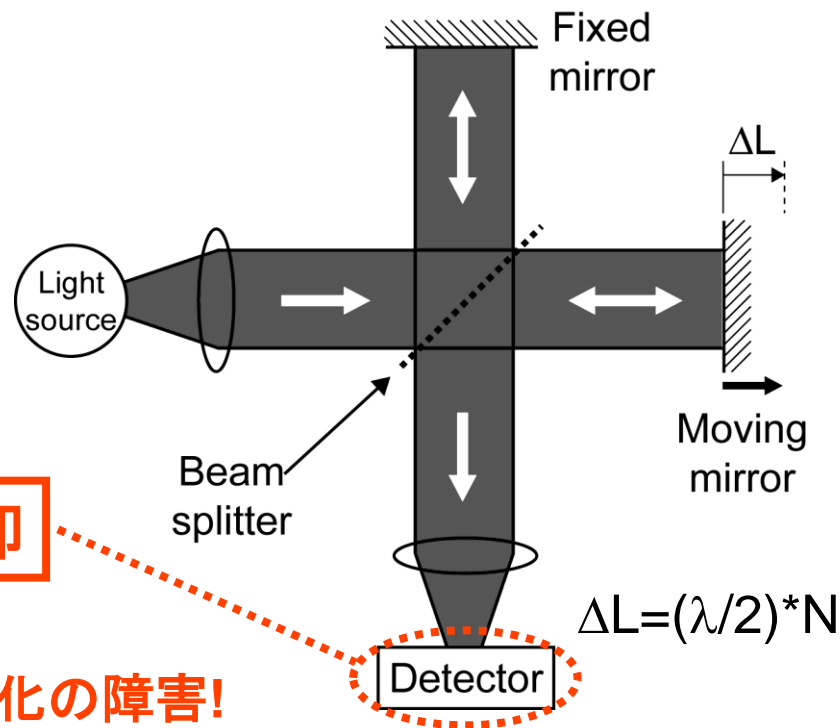
高精度なCW-THz波の周波数計測技術が
求められている!

周波数計測の従来法

電気的手法 (ヘテロダイン)



光学的手法 (干渉計測)



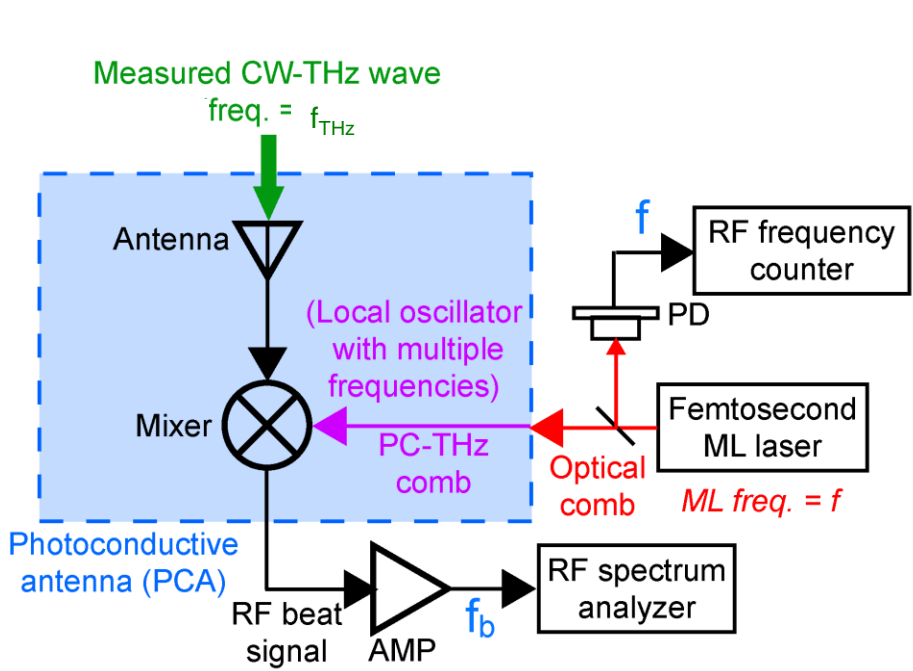
極低温冷却

実用化の障害!

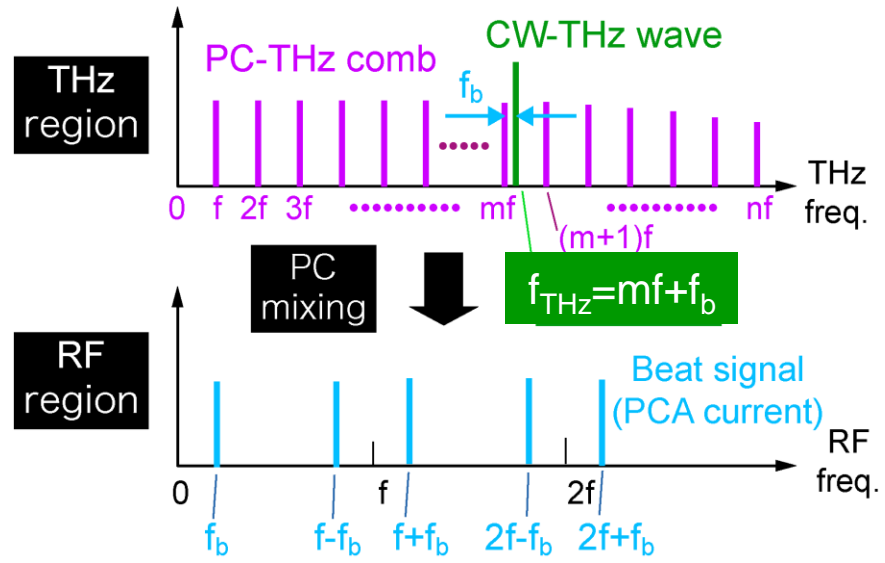
テラヘルツ領域 (0.1~10THz) をカバーすることは難しい

→THz領域をフル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

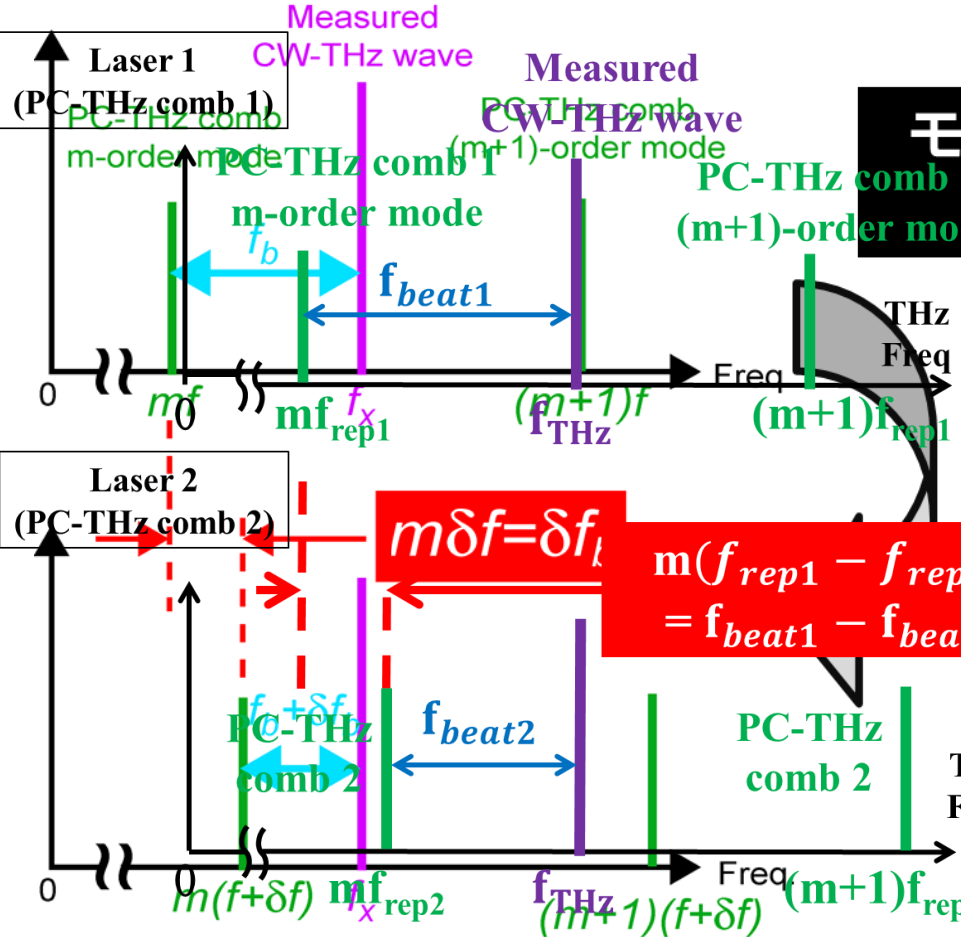


$f_{\text{THz}} = mf \pm f_b$

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).

リアルタイムでの絶対周波数の決定法

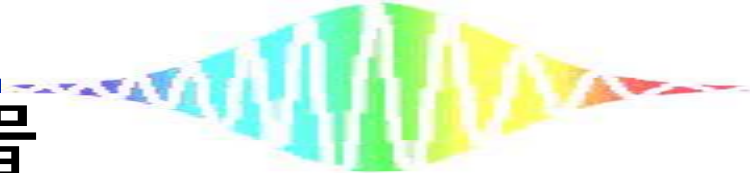


モード
デュアルPC-THzコムを用いた並列計測!

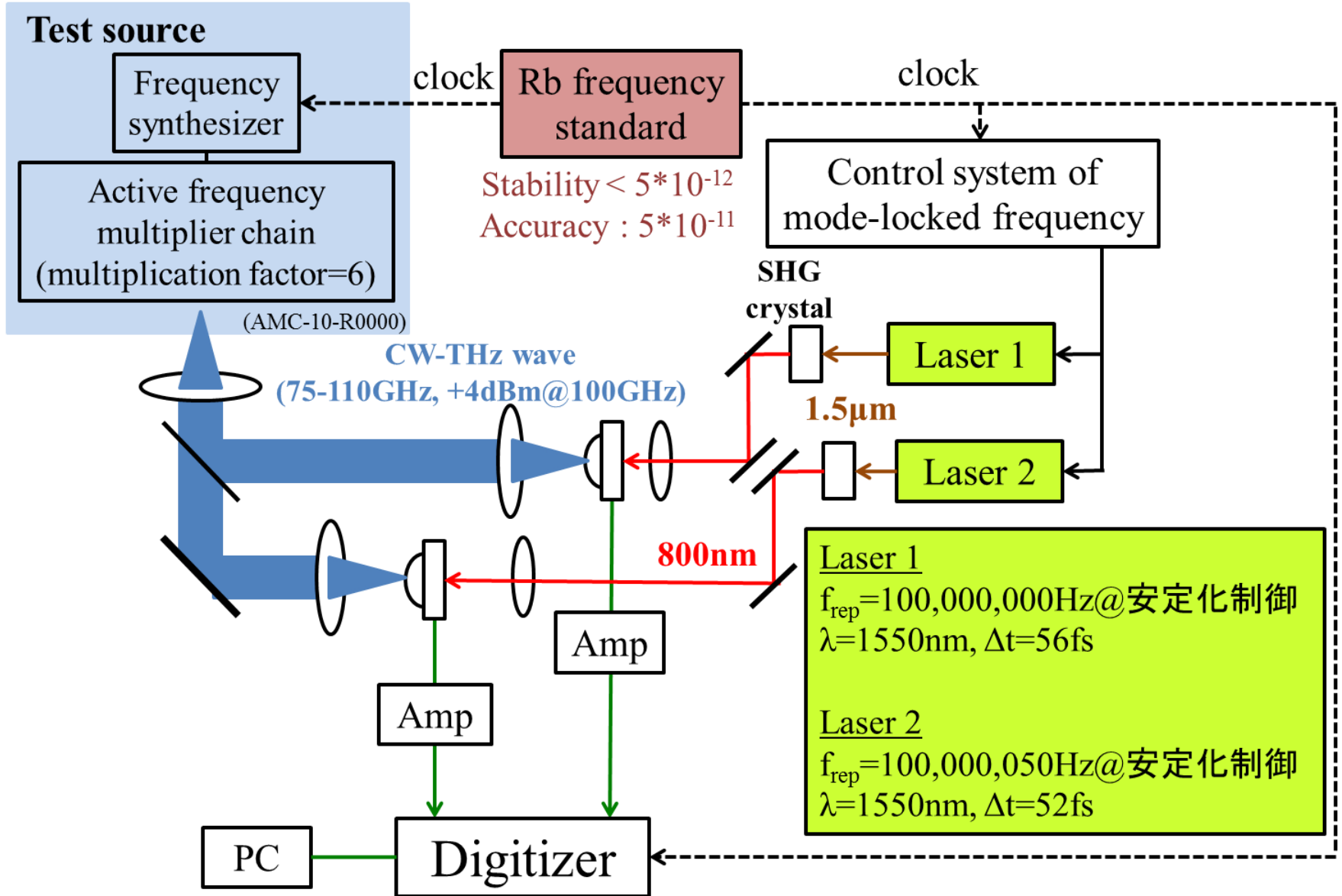
$$m = \frac{|f_{beat1} - f_{beat2}|}{|f_{rep1} - f_{rep2}|}$$

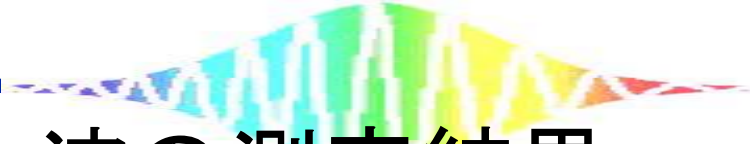
ビート周波数も δf_b 変化 ($f_b \rightarrow f_b + \delta f_b$)

f_{THz} 変動の大きなCW-THz波の絶対周波数は >0)
計測できない! <0)



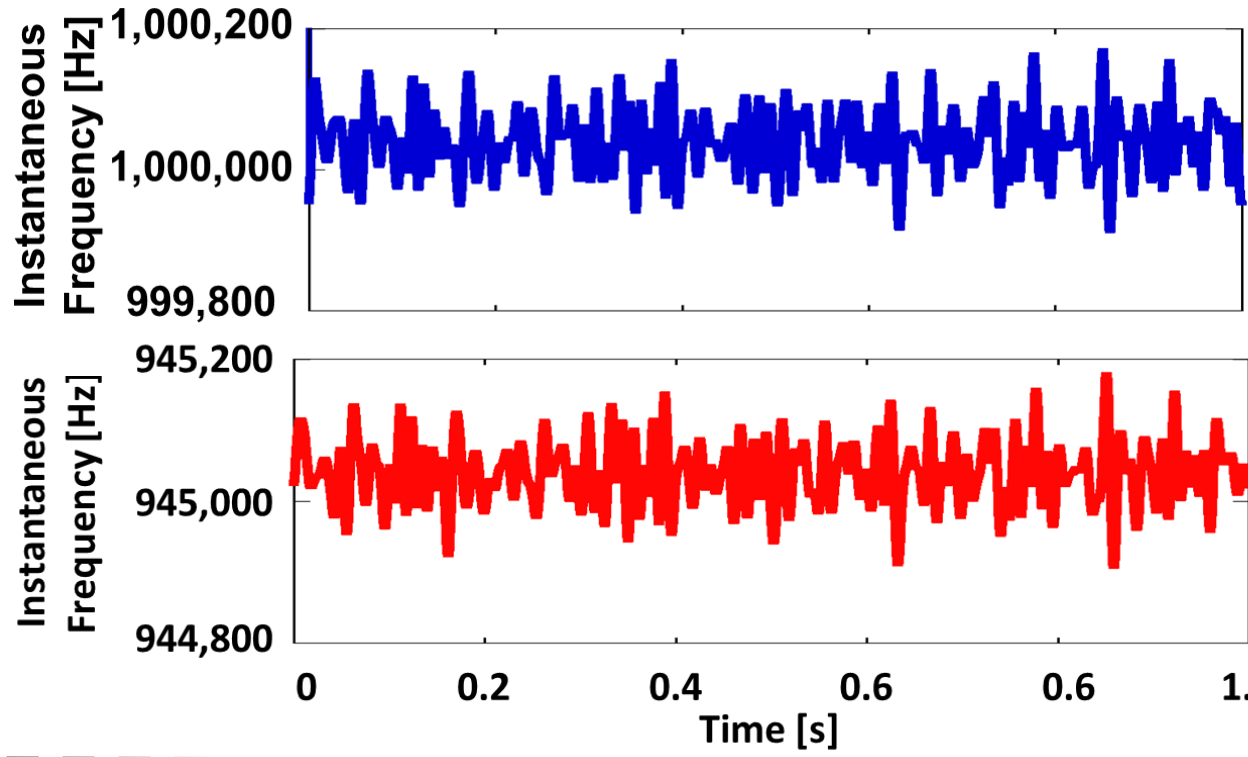
実験装置





ビート周波数とCW-THz波の測定結果

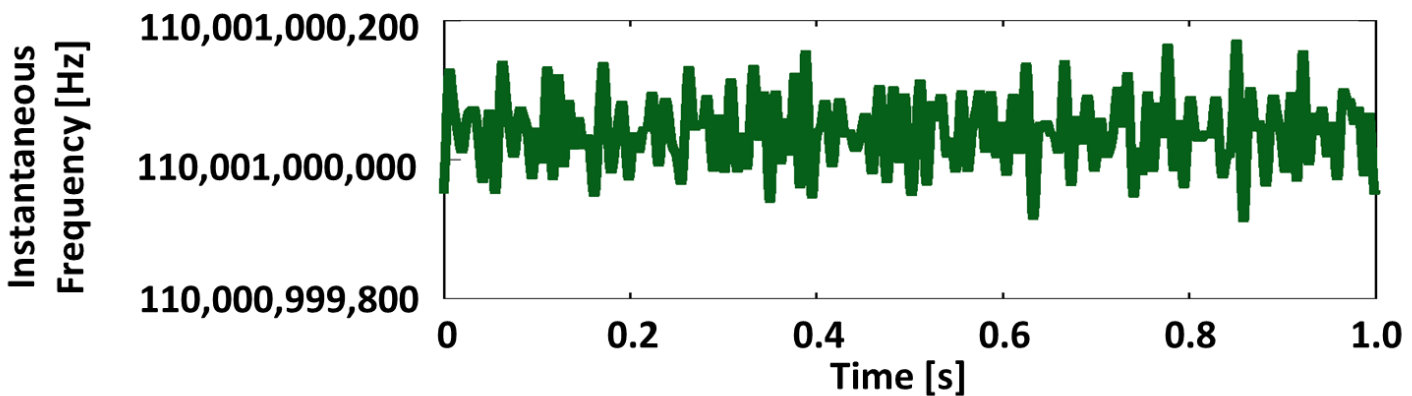
f_{beat1}



実験条件
・ 10ms計測
・ 積算100

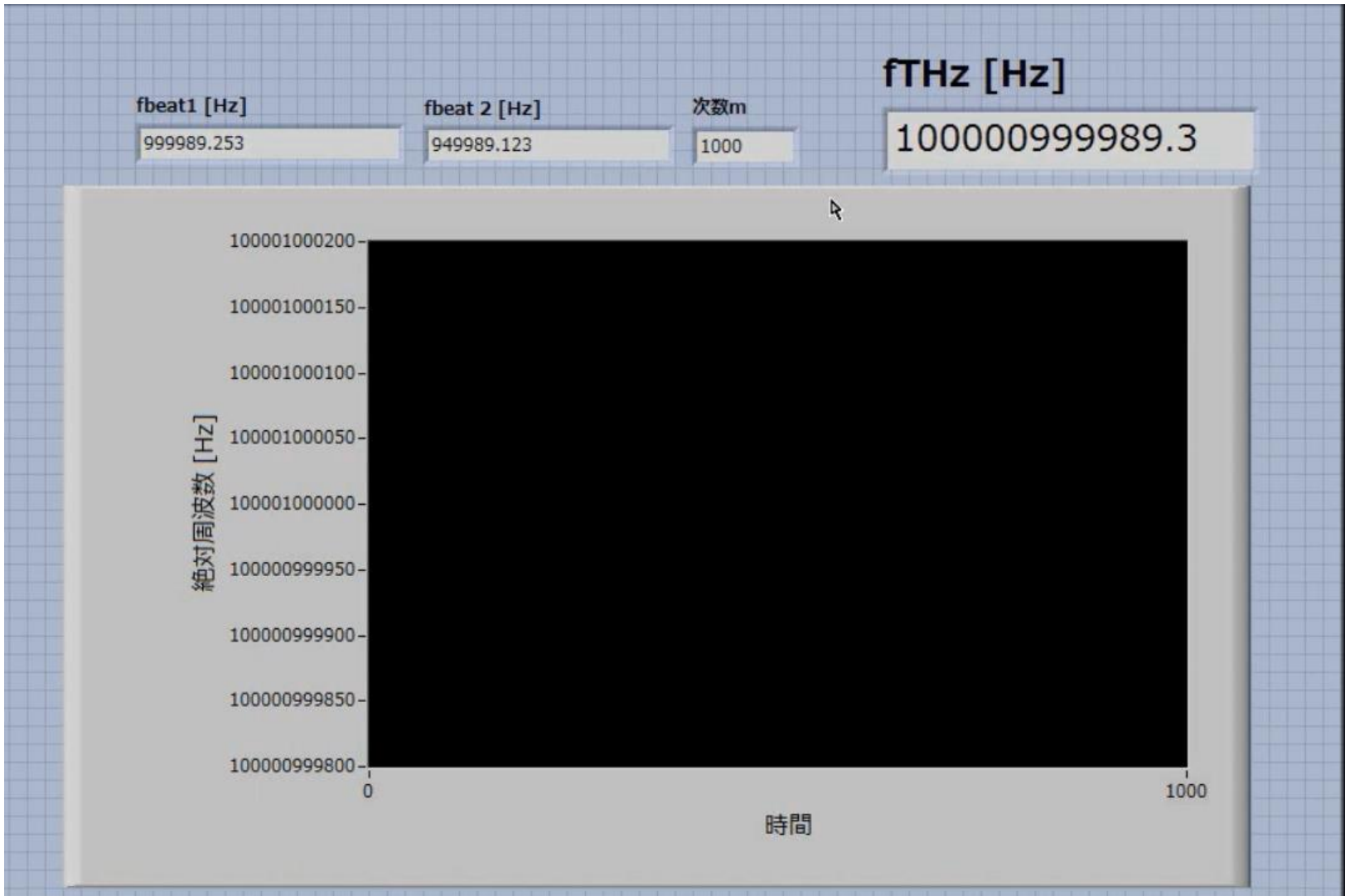
f_{beat2}

f_{THz}



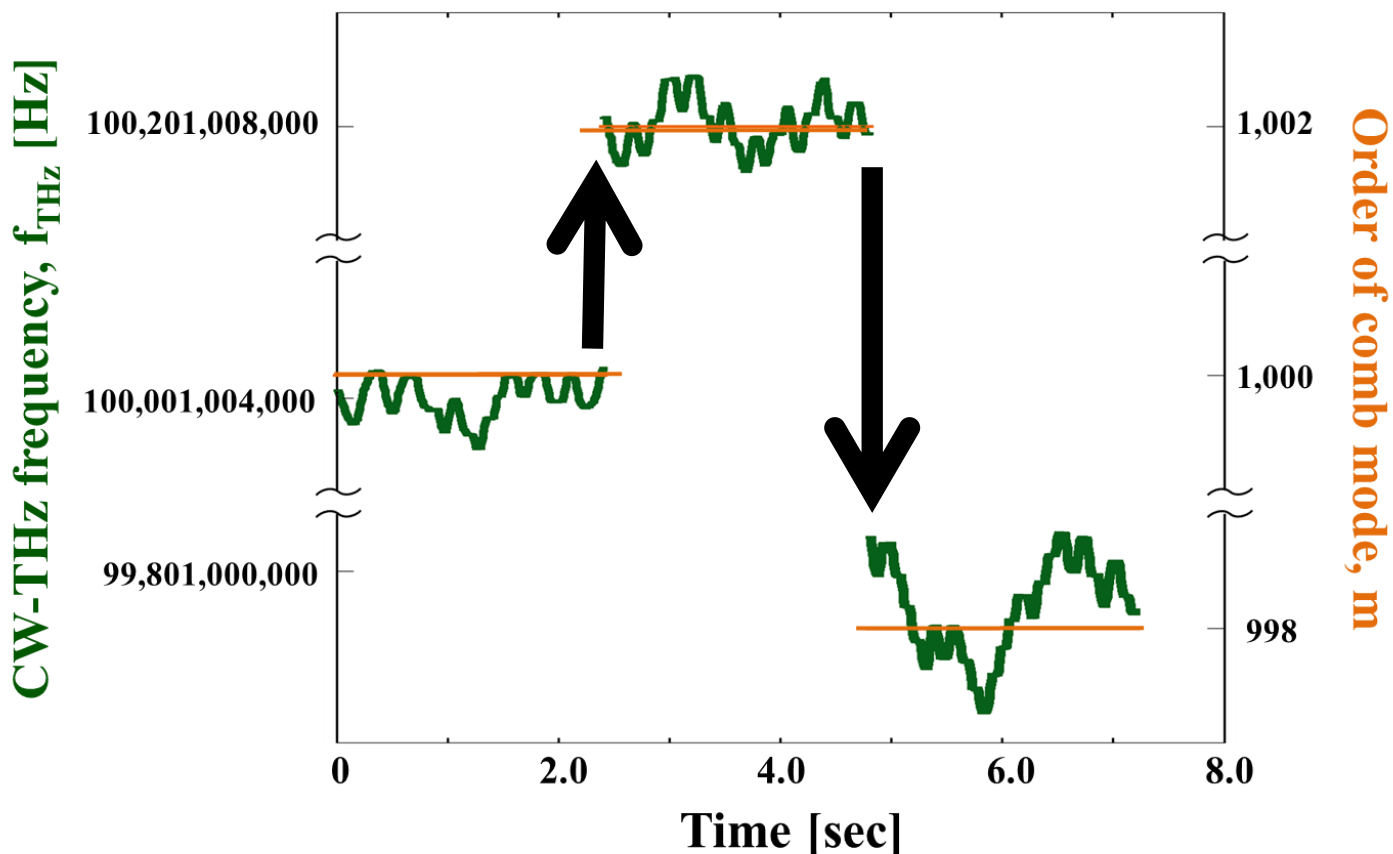
CW-THz波のリアルタイムモニタリング①

(周波数変動=0.1THz±100Hz)



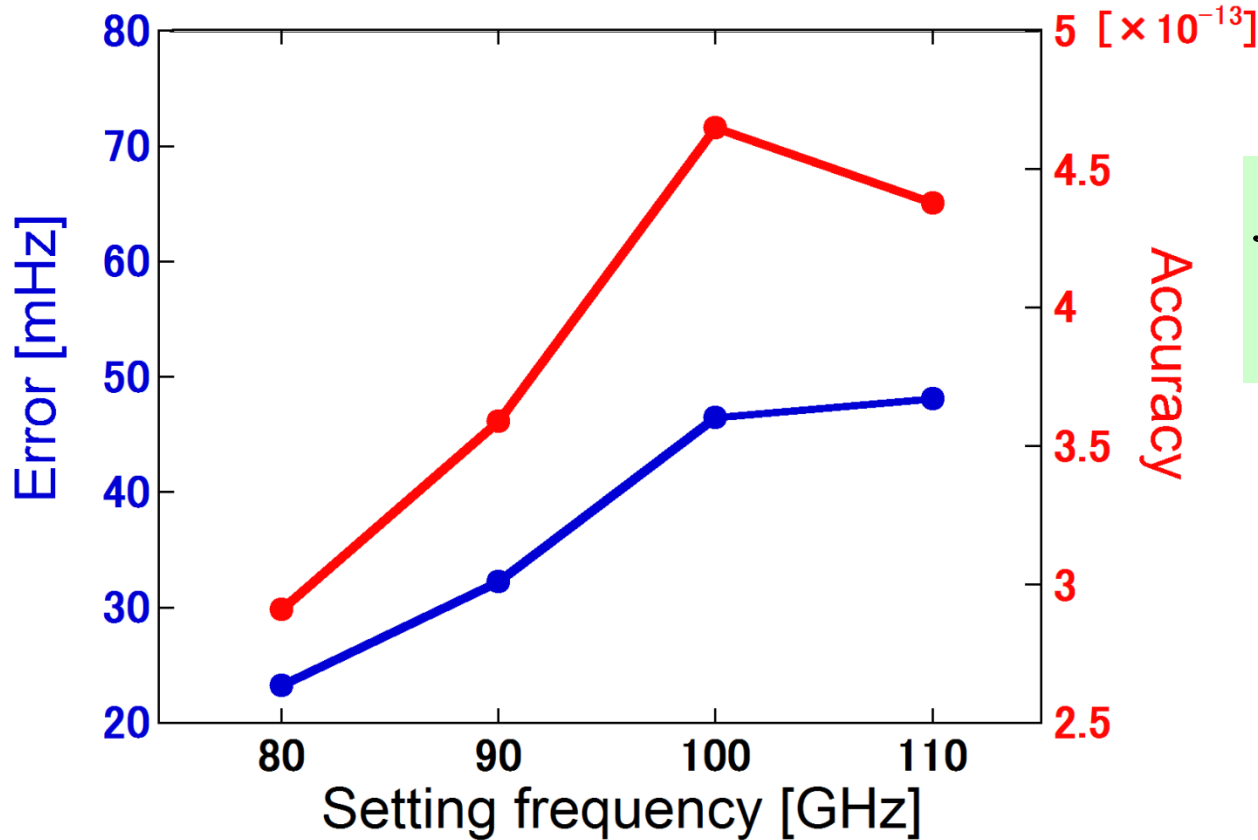
CW-THz波のリアルタイムモニタリング②

(周波数変動=0.1THz±200MHz)



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!

絶対周波数計測の実験確度



測定誤差の見積もり

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

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

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

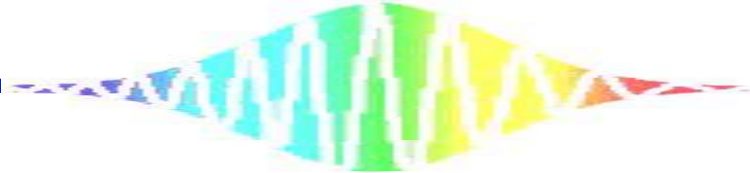
$$\Delta f_{beat1} = 21\text{mHz}$$

$$m = 800 \sim 1100$$



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

本実験での平均確度 = 3.9×10^{-13}

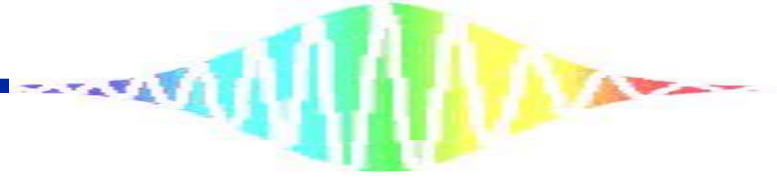


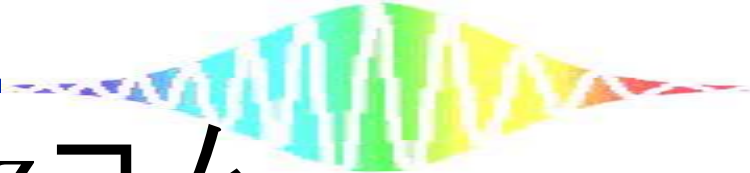
まとめ

デュアルPC-THzコムを用いることで、
リアルタイムで精度の高い絶対周波数計測
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



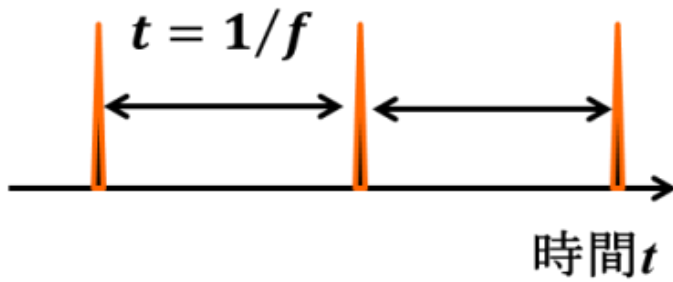


光コムとTHzコム

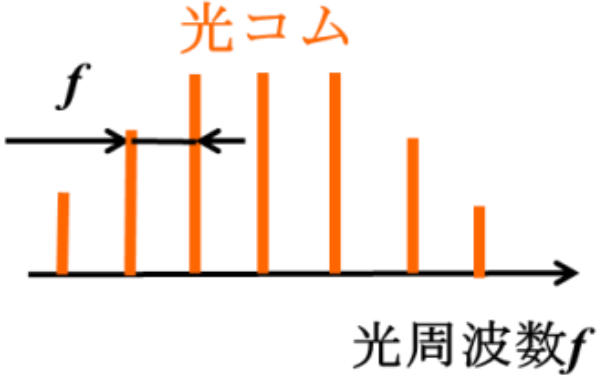
時間領域

周波数領域

モード同期超短パルス列

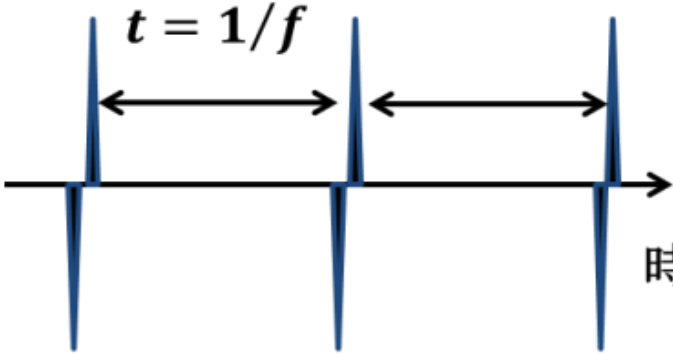


フーリエ変換

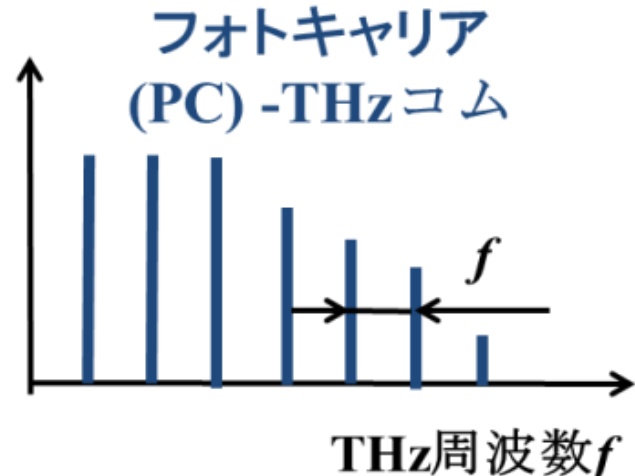


THz検出用PCAに入射すると

ピコ秒モード同期パルス列



フーリエ変換

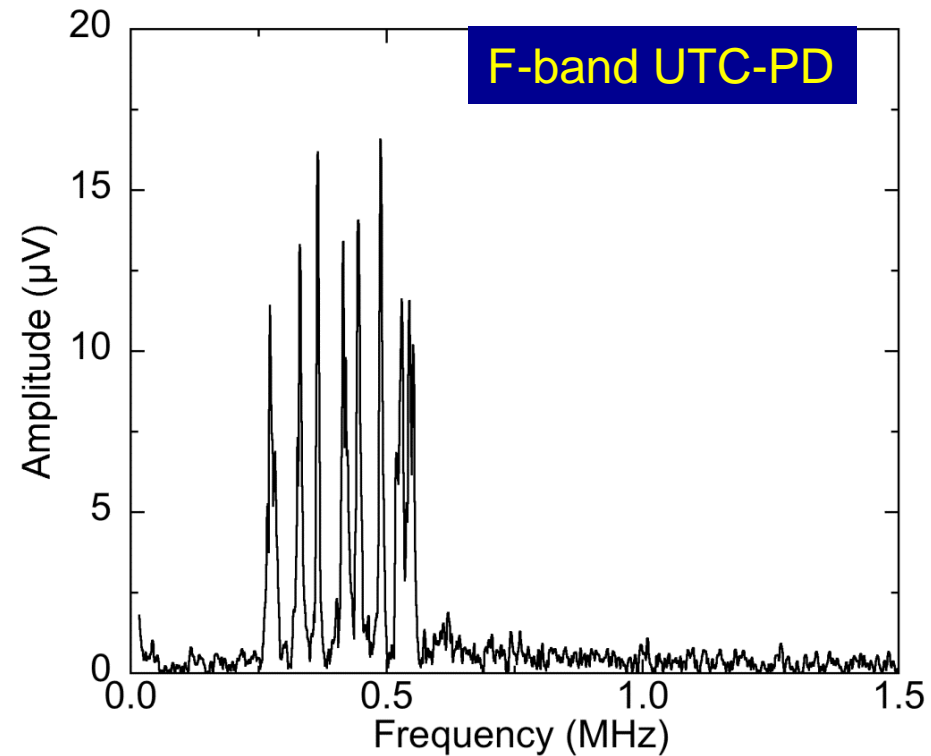
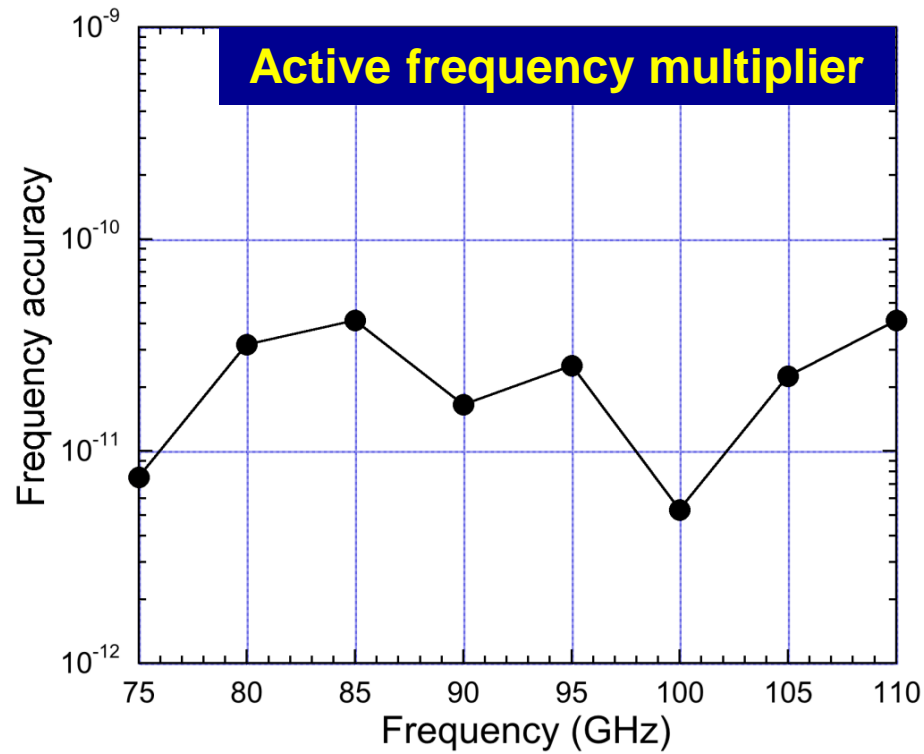


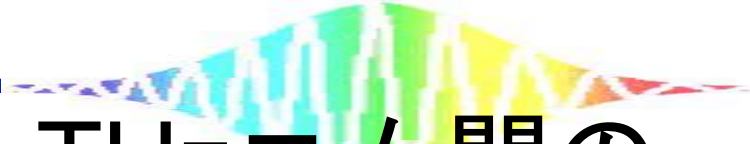
従来研究

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

絶対周波数計測

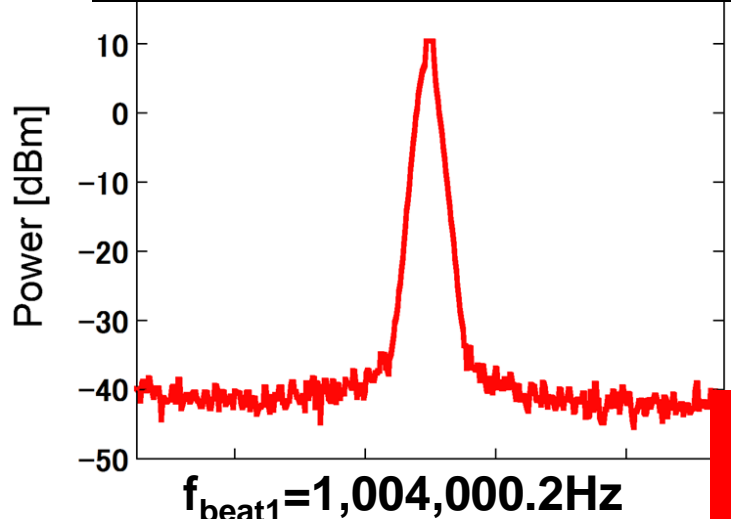
ビート信号のリアルタイムモニタリング



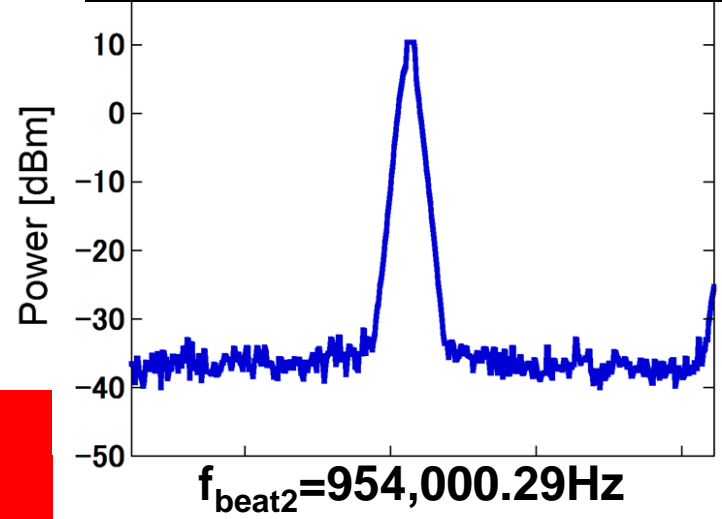


CW-THz波と2つのPC-THzコム間のビート信号

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!

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

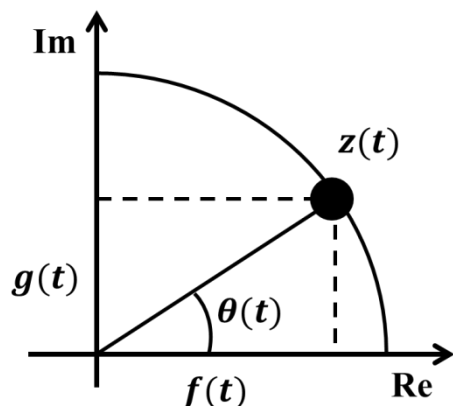
$$= \frac{|1,004,000.2 - 954,000.29|}{|100,000,000 - 100,000,050|} = 1000$$

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

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

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

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

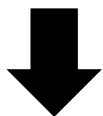
これにより求まる瞬時位相を微分することで、瞬時周波数を算出することが出来る!

研究背景

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

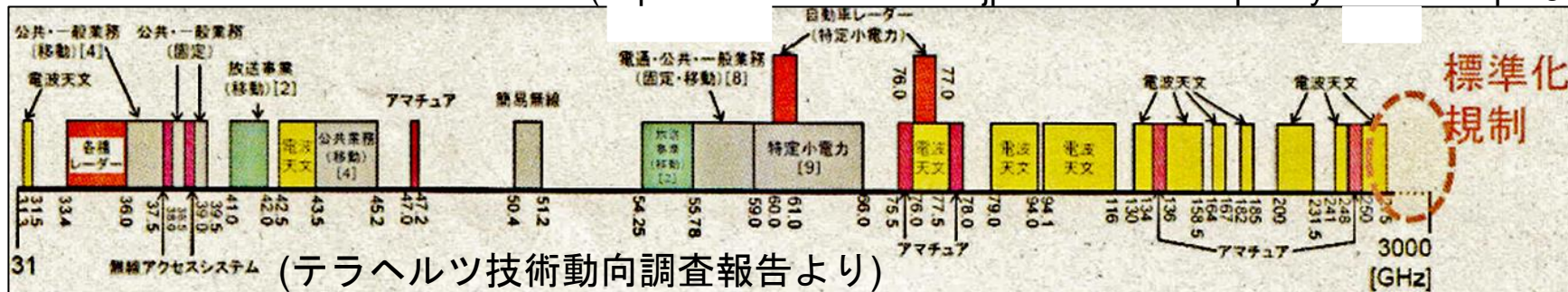
テンポラリなネットワーク

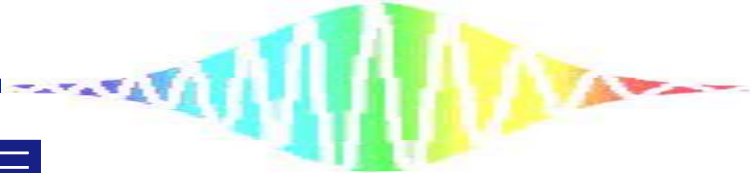


ホットスポット, レンタルDVDショップ



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

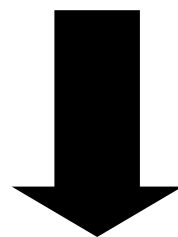




研究背景

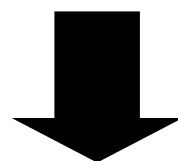
周波数は電磁波の基本的な物理量である

THz無線通信等の
様々なTHzのアプリが確立

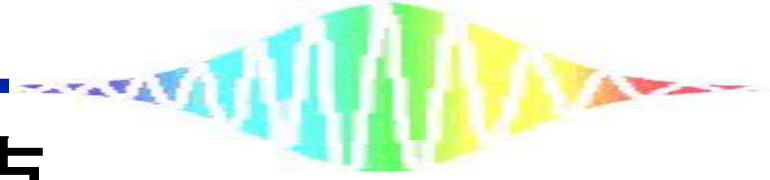


実用的なCW-THz 光源
(THz-QCL, UTC-PDなど)
の発達


高精度なCW-THz波の周波数計測が
必要になる!

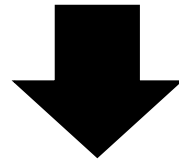


しかしながら、CW-THz波の絶対周波数計測は
十分に確立していない!



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!**

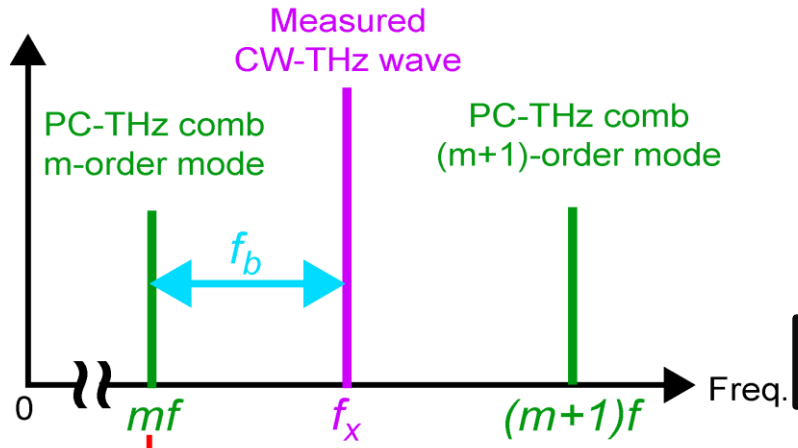


今回の研究

- 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**

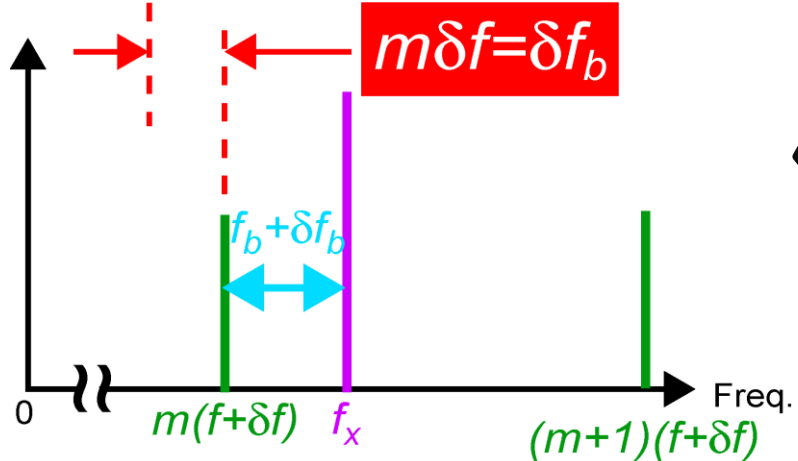


従来のTHzスペアナの問題点



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

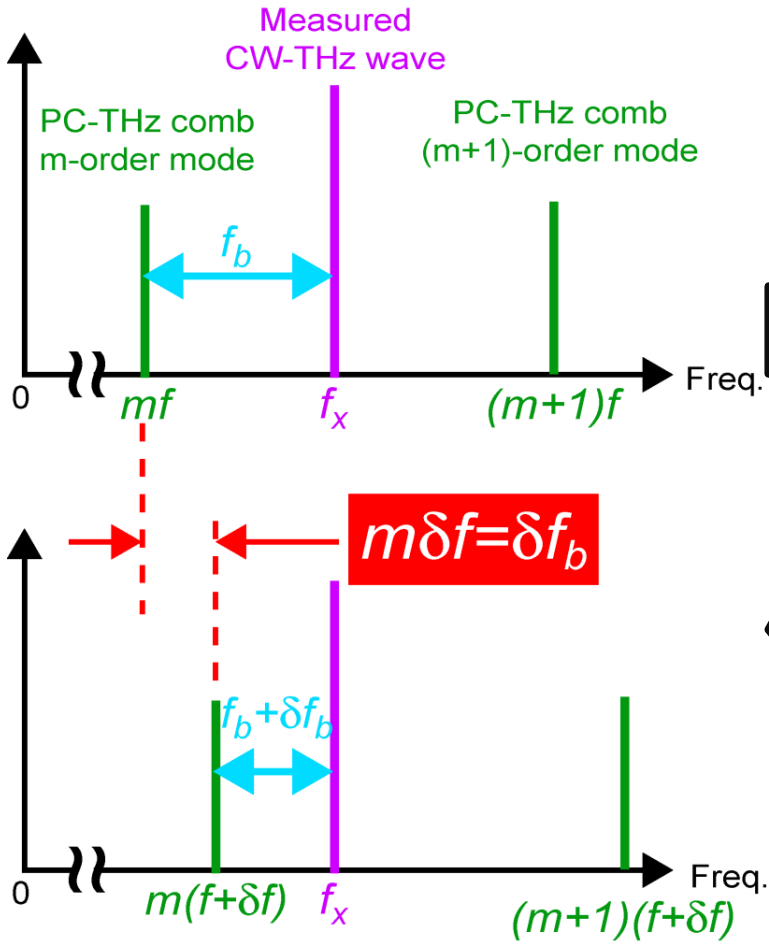
$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|}$$



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！

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 ($f_b \rightarrow f_b + \delta f_b$)

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

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