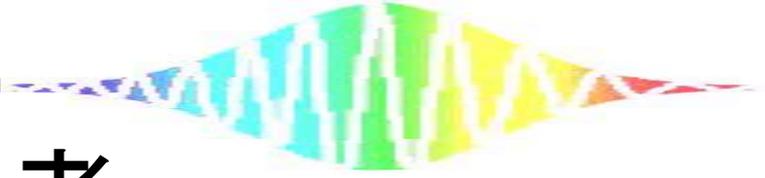


デュアルTHzコムを用いたCW-THz波 のリアルタイム絶対周波数計測

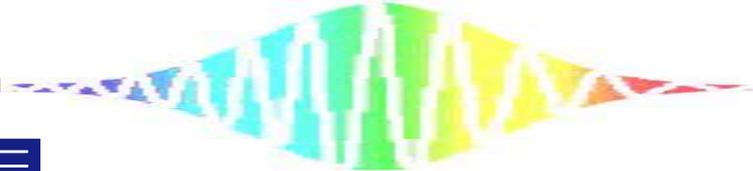
徳島大学

林 建太, 小倉 隆志, 安井 武史



共同研究者

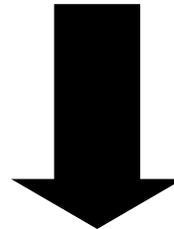
電通大 美濃島薫 教授
産総研 稲場肇 博士



研究背景

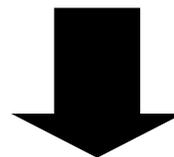
周波数は電磁波の基本的な物理量である

THz無線通信等の
様々なTHzのアプリが確立



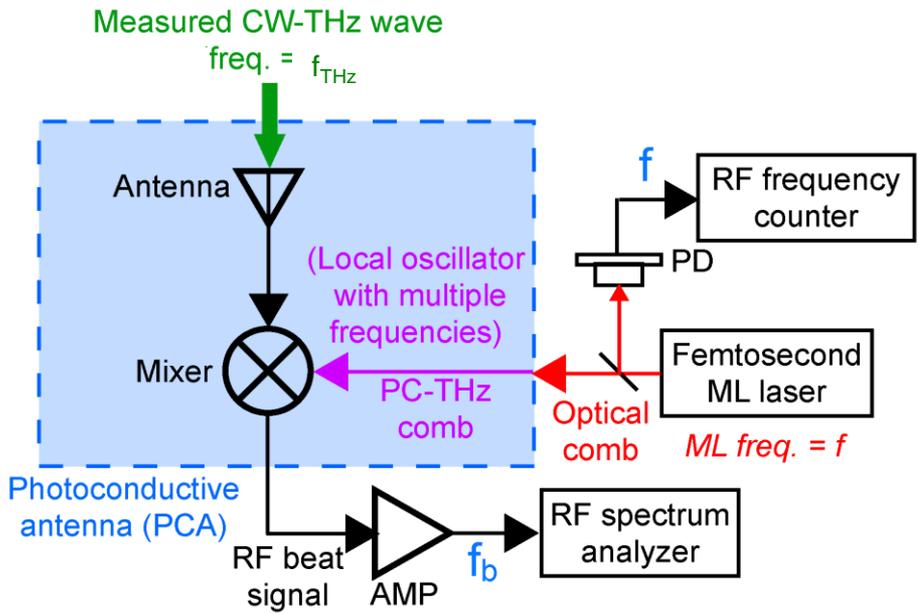
実用的なCW-THz 光源
(THz-QCL, UTC-PDなど)
の発達

高精度なCW-THz波の周波数計測が
必要になる!

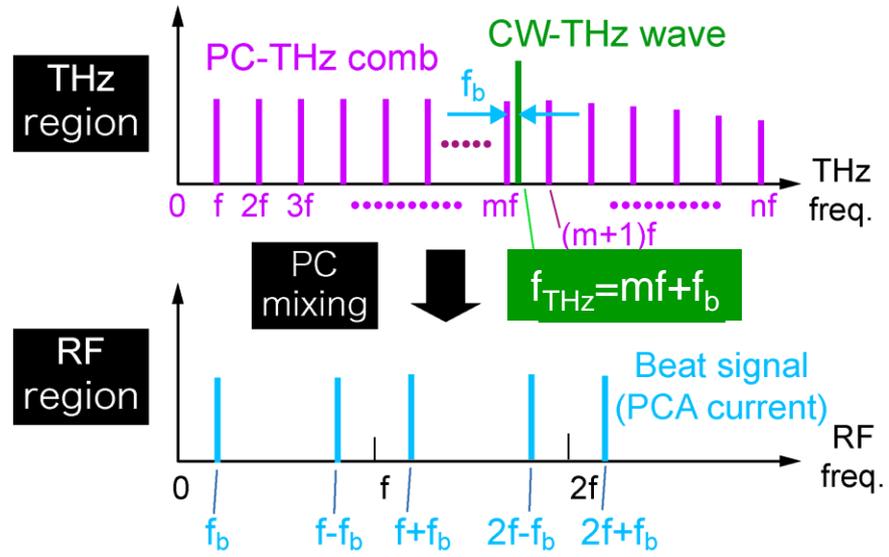


しかしながら、CW-THz波の絶対周波数計測は
十分に確立していない!

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



Freq. domain

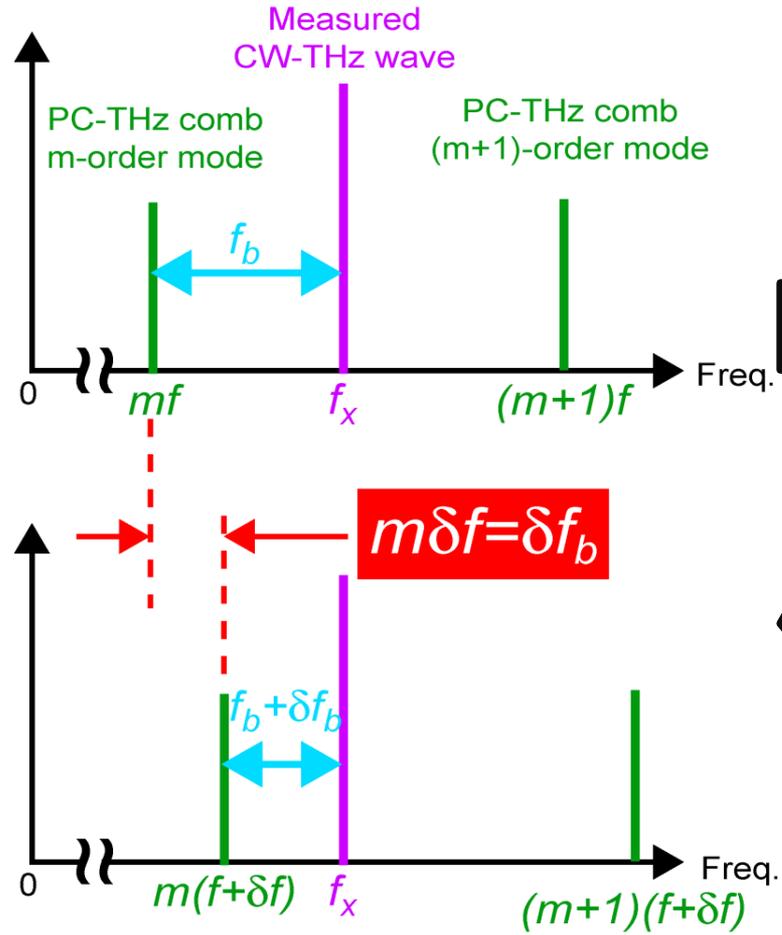


$$f_{\text{THz}} = mf \pm f_b$$

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).

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

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

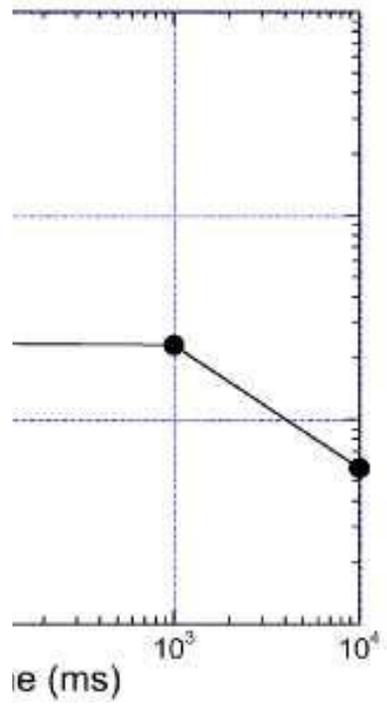
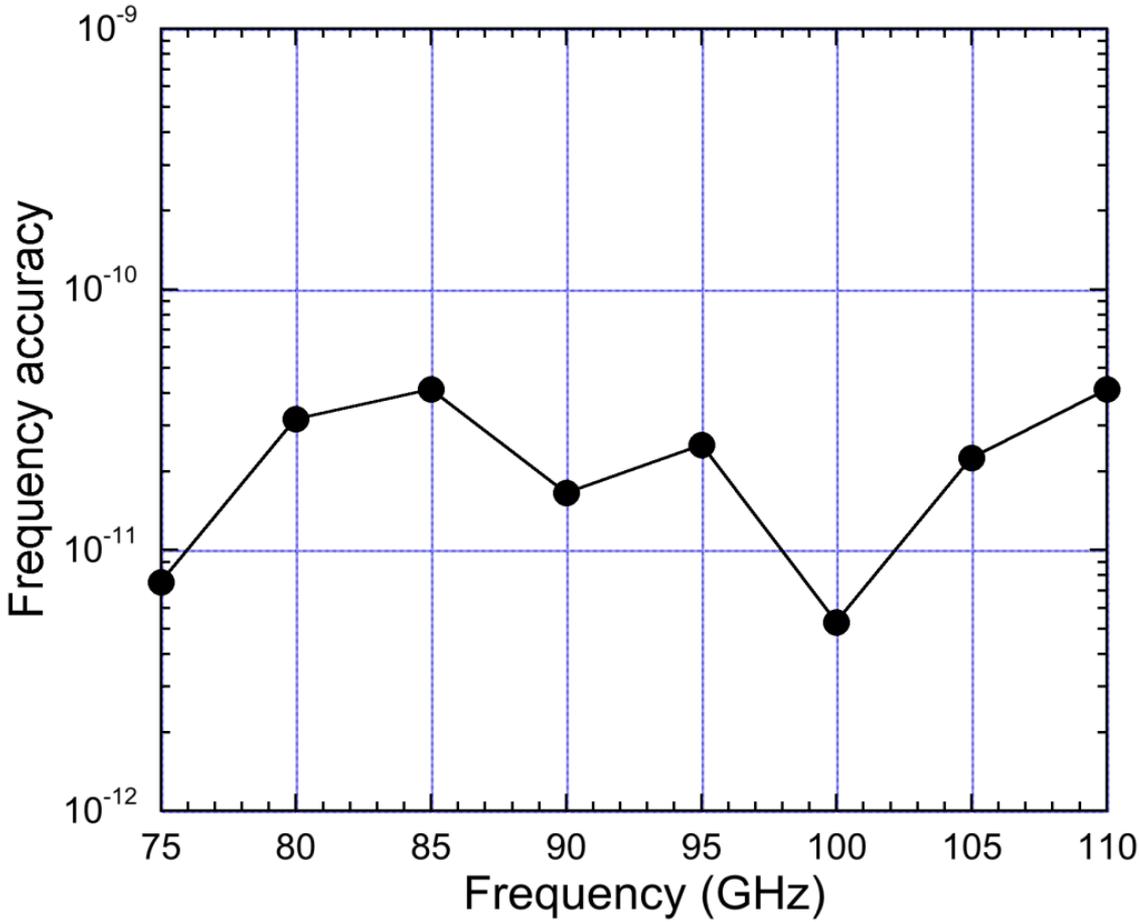
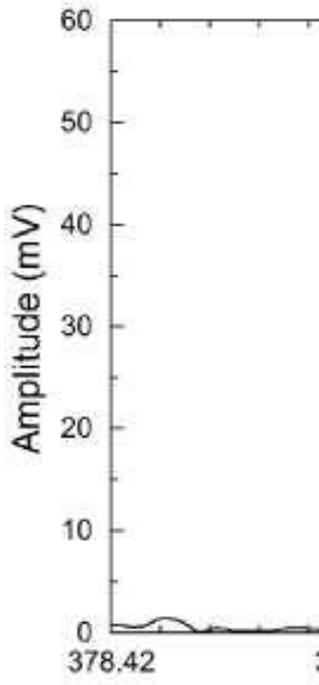
$$f_{THz} = mf_{rep1} + f_{beat1} \quad (\delta f_b / \delta f < 0)$$



研究経過①

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

絶対周波数計測



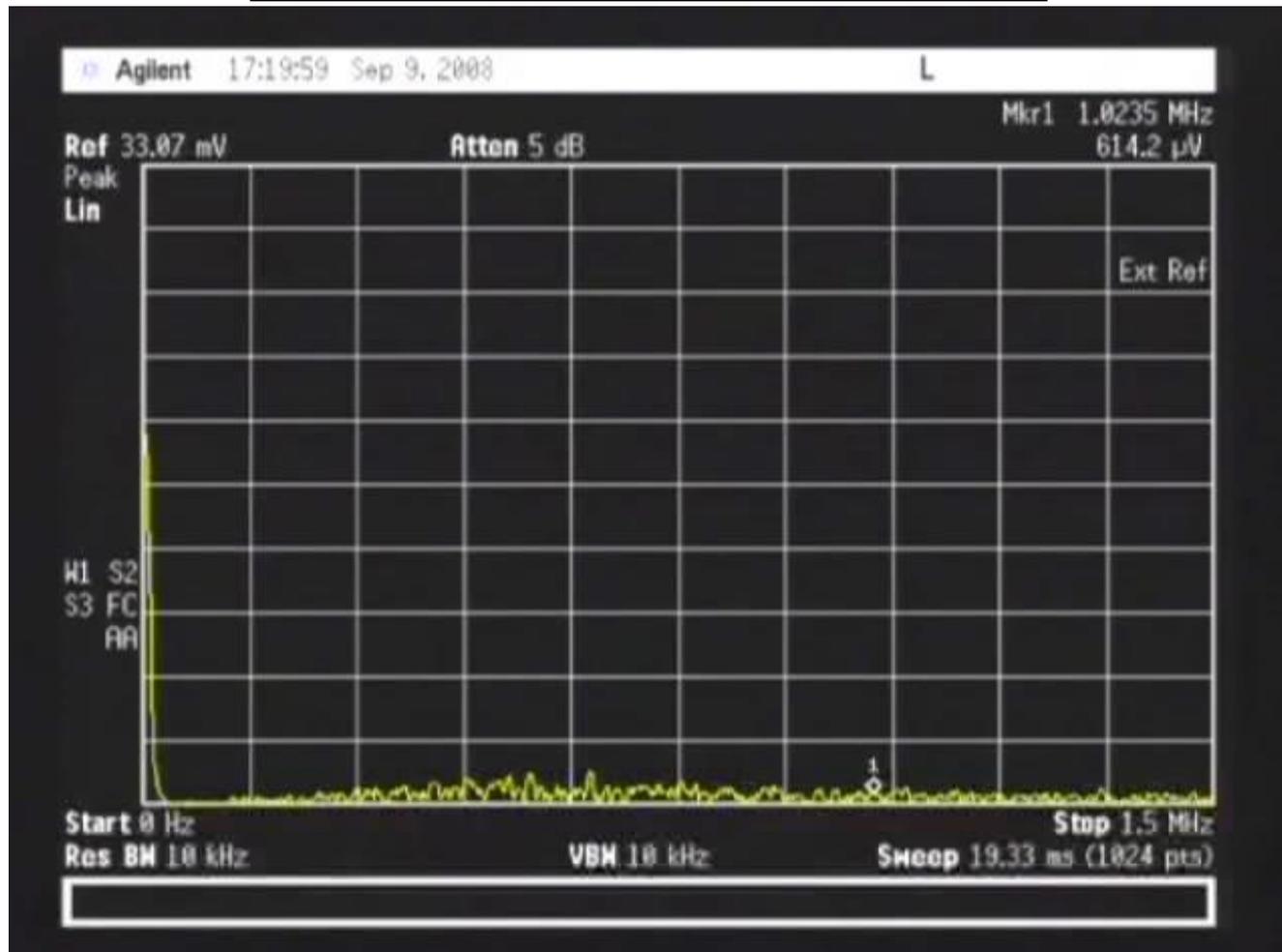
ビー

言号の
安定性

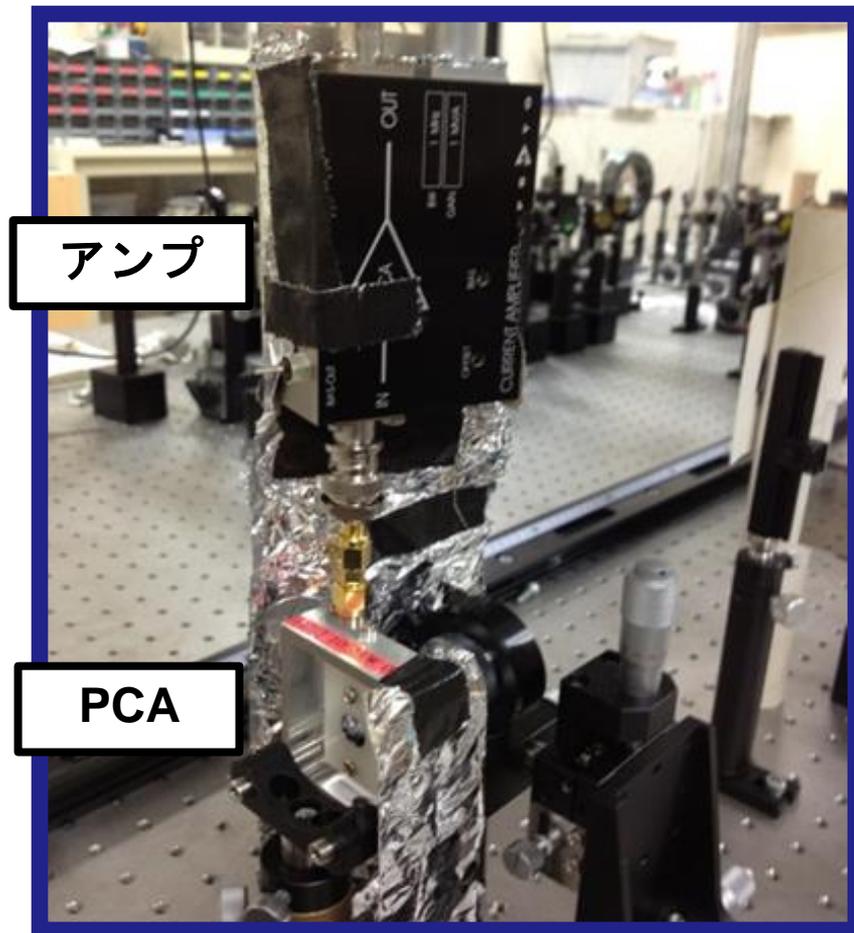
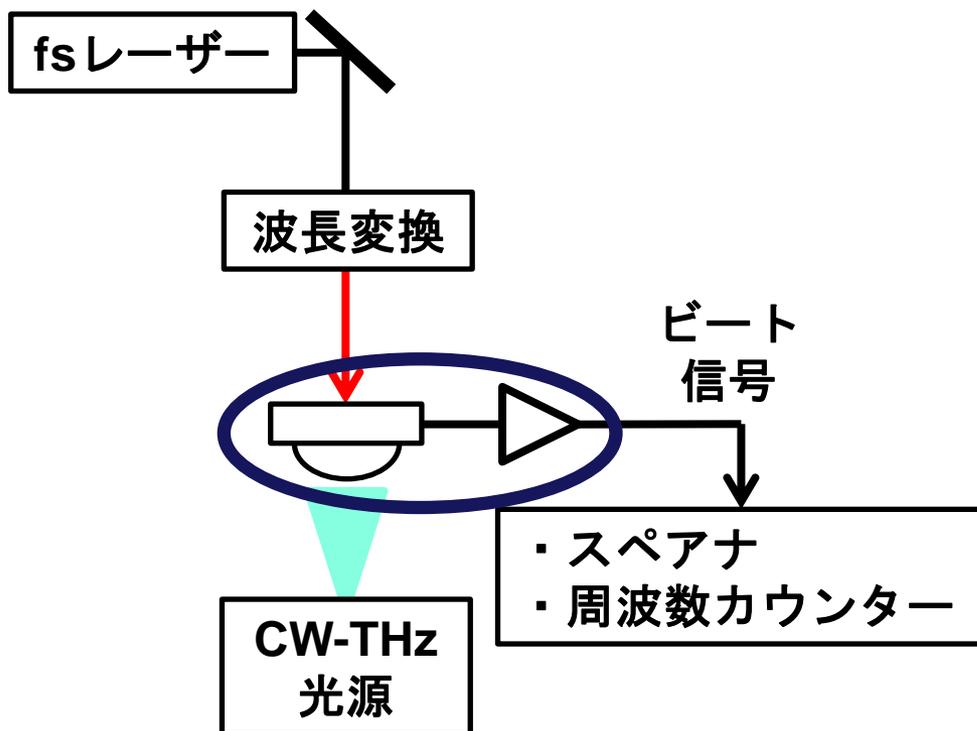
研究経過②

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

UTC-PDとのビート信号のリアルタイムモニタリング

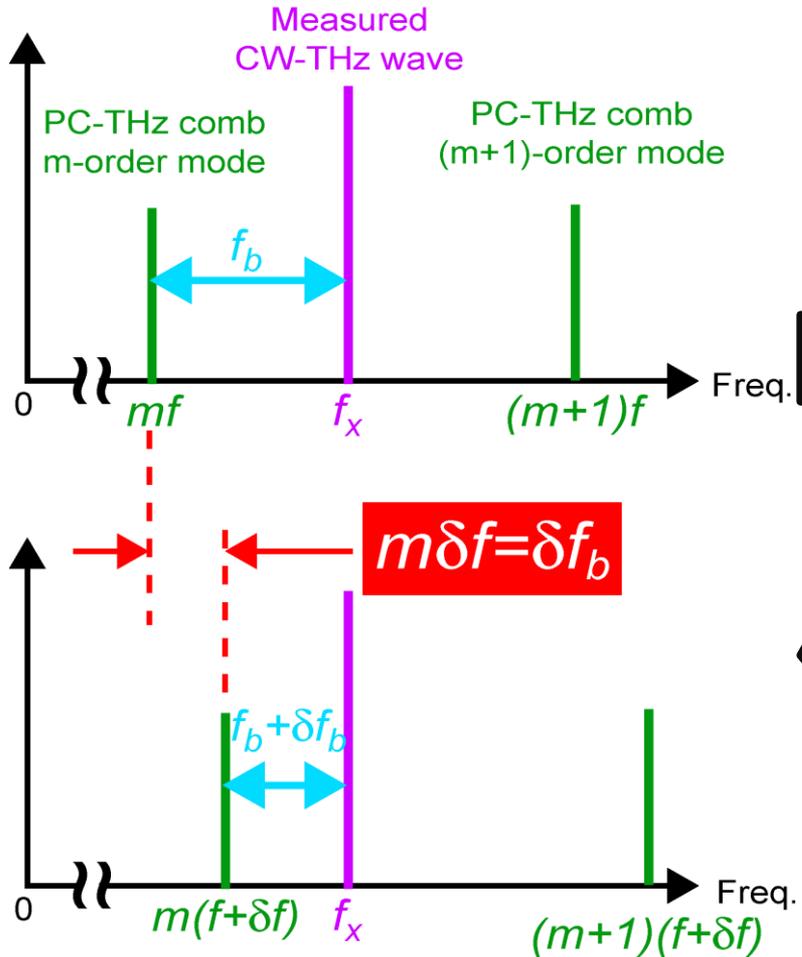


THzコムスペアナの問題点①



**測定ヘッド(PCAとカレントプリアンプ部分)
が大型である**

THzコムスペアナの問題点②



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

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

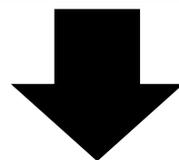
2ステップ測定

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

リアルタイムで絶対周波数を決定できない!
(時々刻々と変化するCW-THz波は測定困難)

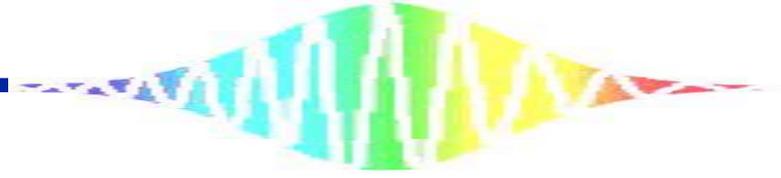
従来研究における問題点

- ① 測定ヘッド (PCAとカレント・プリアンプ) が**大型化**！
- ② CW-THz波の絶対周波数を**リアルタイムで決定**出来ない！



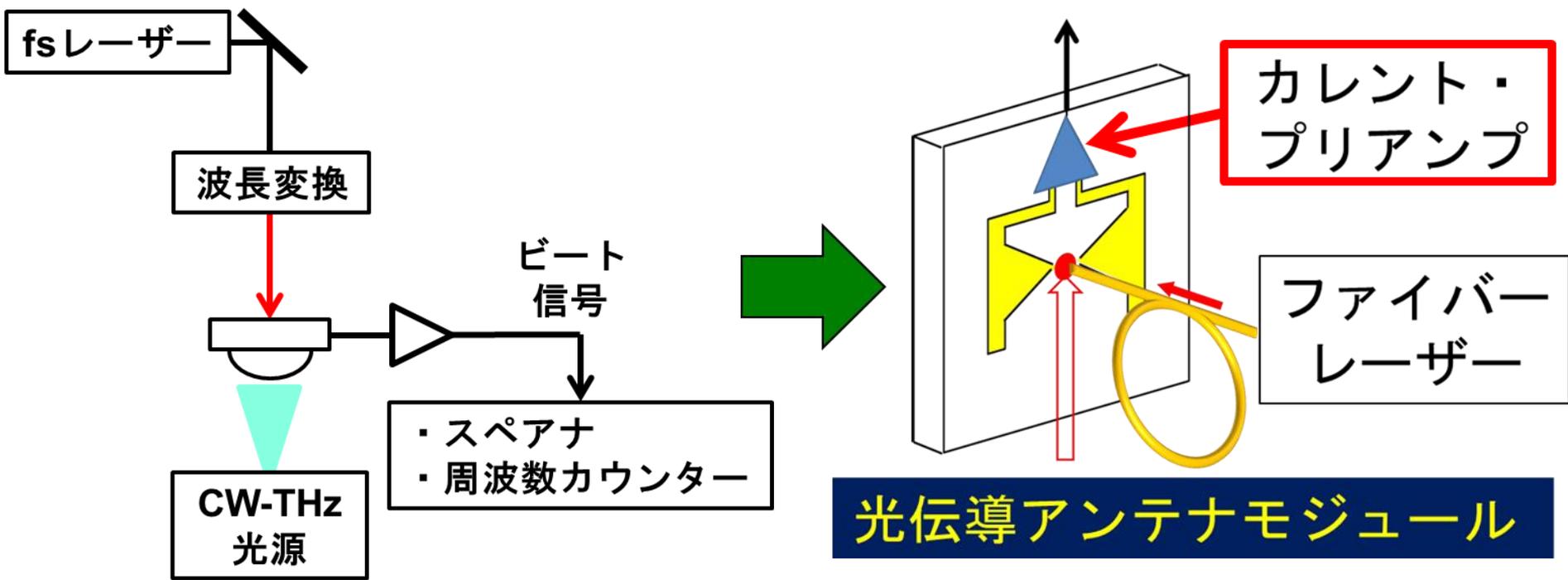
今回の研究

- ① **小型PCA・アンプ複合モジュールを開発し、特性評価を行う**
- ② デュアルPC-THzコムを用いることで、変動しているCW-THz波の絶対周波数を**リアルタイムで決定**する



① 小型PCA・アンプ複合 モジュールの開発

小型PCA・アンプ複合 モジュールの開発

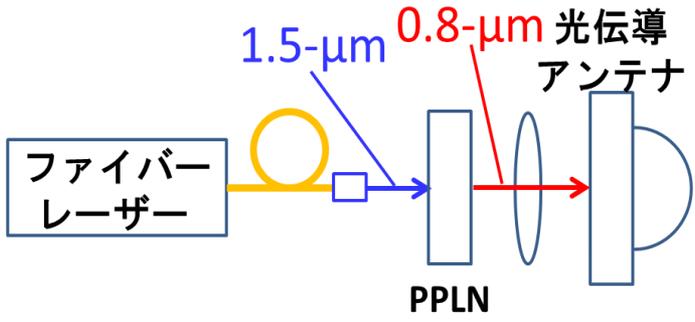


小型、フレキシブル、ロバスト、アライメントフリーといった利点が付加できる

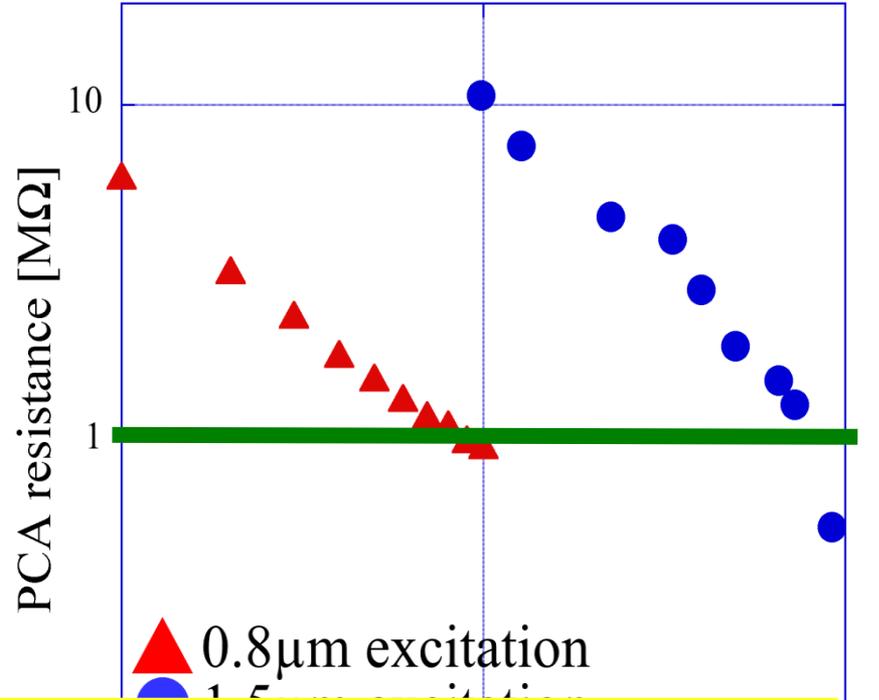
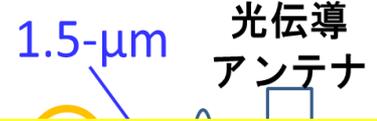
(a) LT-GaAs-PCAへの1.5μm光 直接カップリング

PCA励起光波長による違い@パワー依存性

LT-GaAs-PCA@0.8μm光



LT-GaAs-PCA@1.5μm光

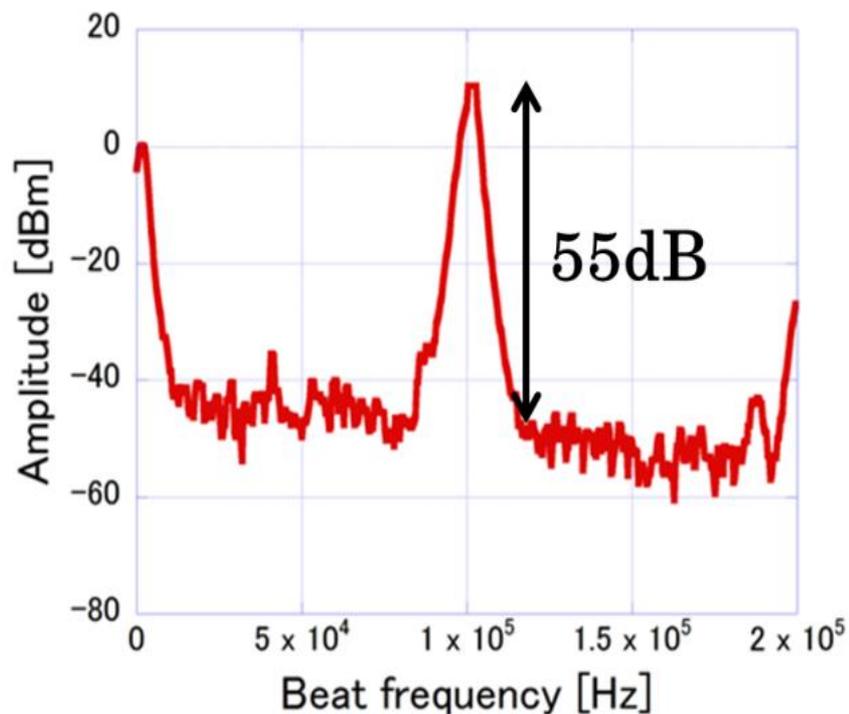


十分なパワーをしっかりと集光すれば、同数の
フォトキャリア数を生成可能

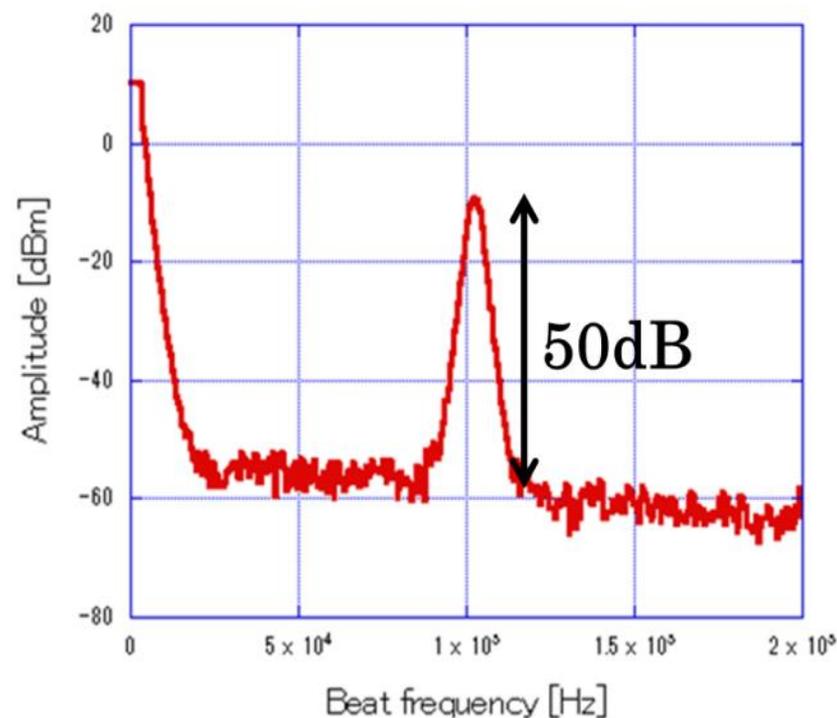
THzコムスペアナ信号SN比(100kHz)

0.8 μ m光

入射パワー=14mW

PCA抵抗値=0.65M Ω 1.5 μ m光

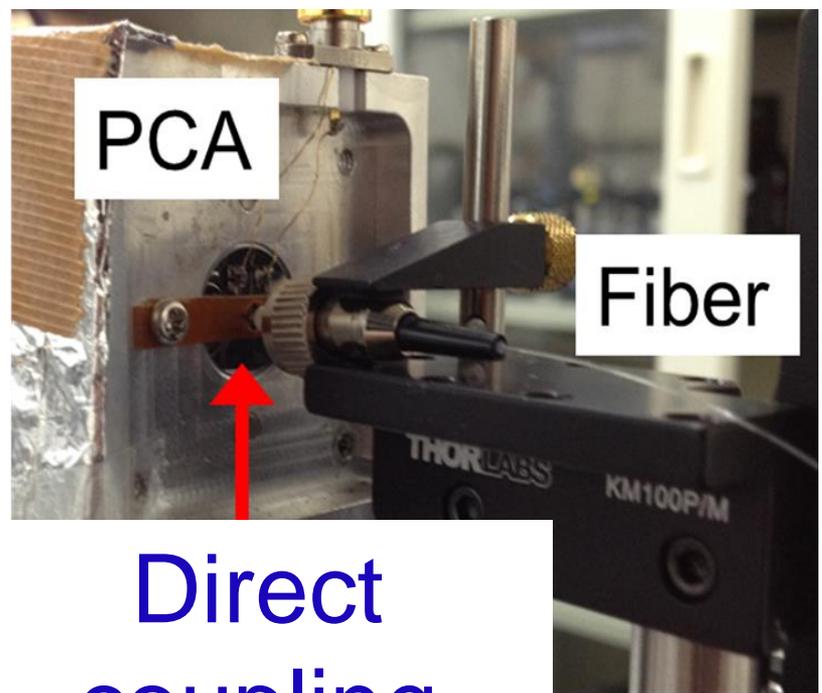
入射パワー=100mW

PCA抵抗値=1.2M Ω 

1.5 μ m光において0.8 μ m光と同等の検出感度を確認

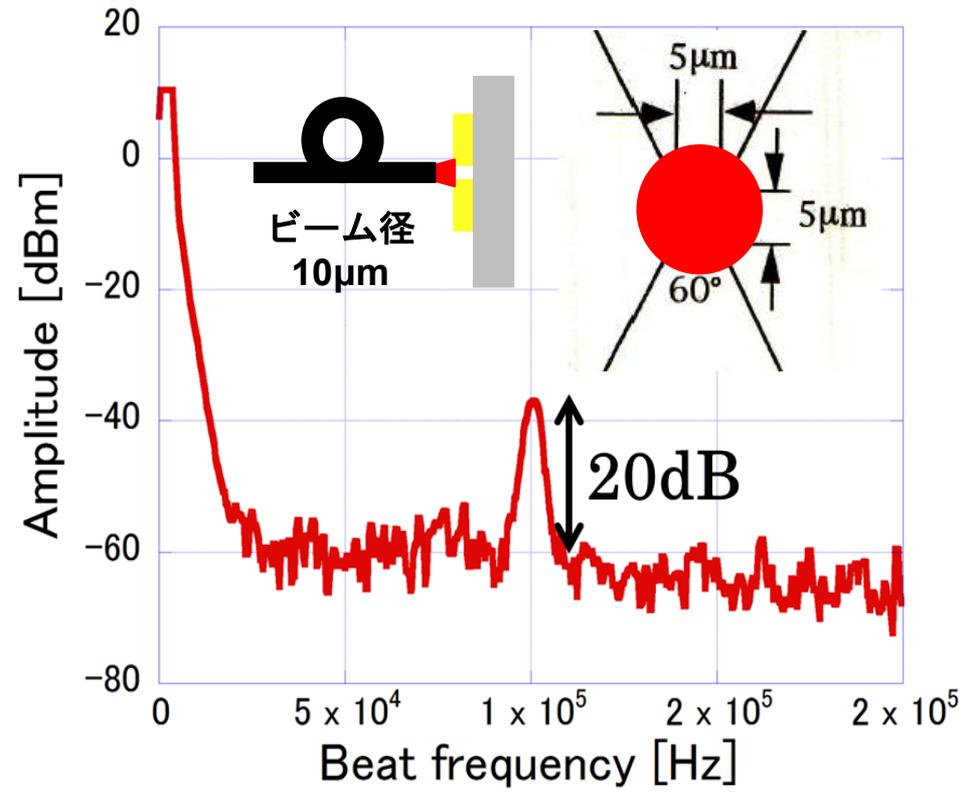
ファイバーの直接カップリング

入射パワー=189mW
PCA抵抗値=1.8MΩ



Direct coupling

ビート周波数=100kHz



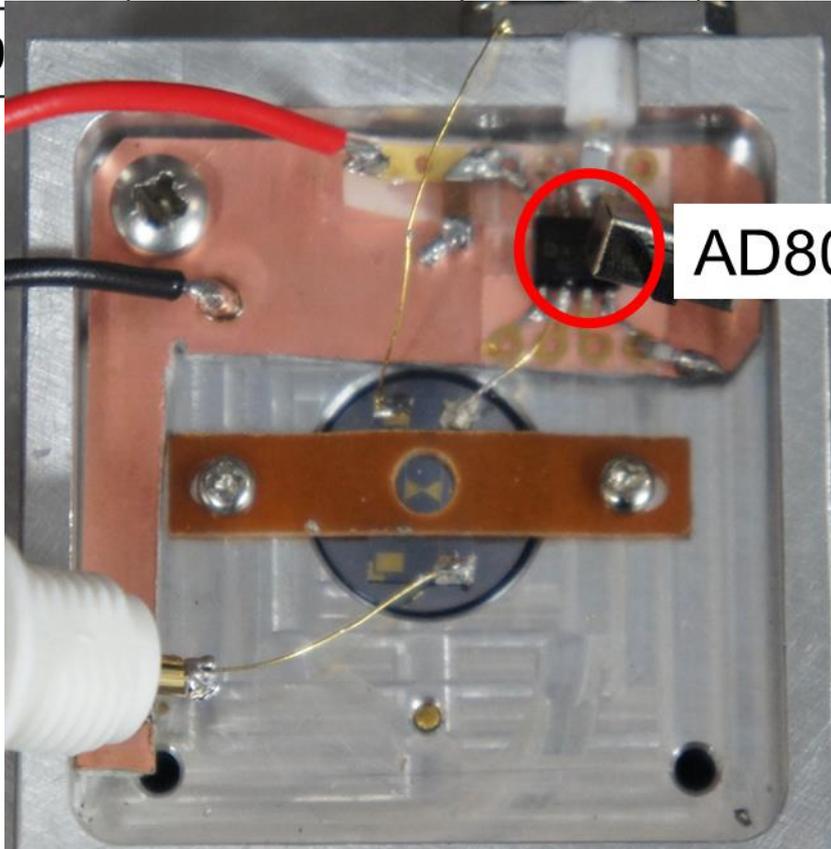
レーザー光のコリメート&集光
アンテナ形状の最適化

レンズを用いて集光した
場合に比べ30dB低下

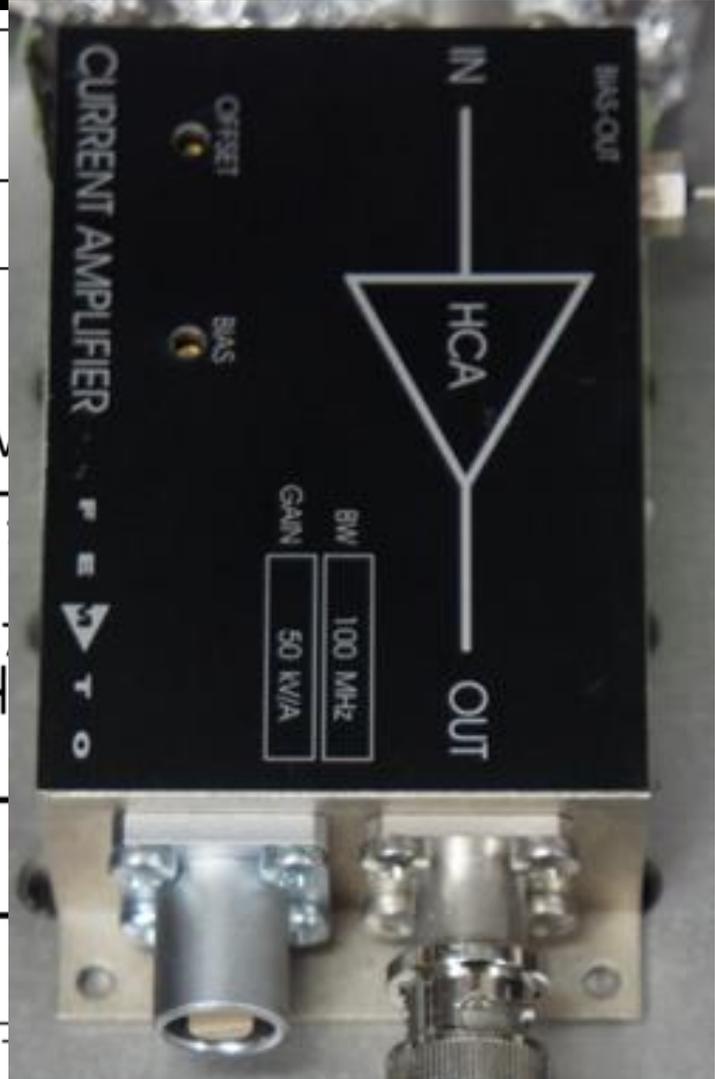
(b) PCAと高速アンプのモジュール化

トランス・インピーダンスアンプ

型番	ゲイン R[kΩ]	GB積 f_u [MHz]	入力容量 C_{IN} [pF]
AD80			4

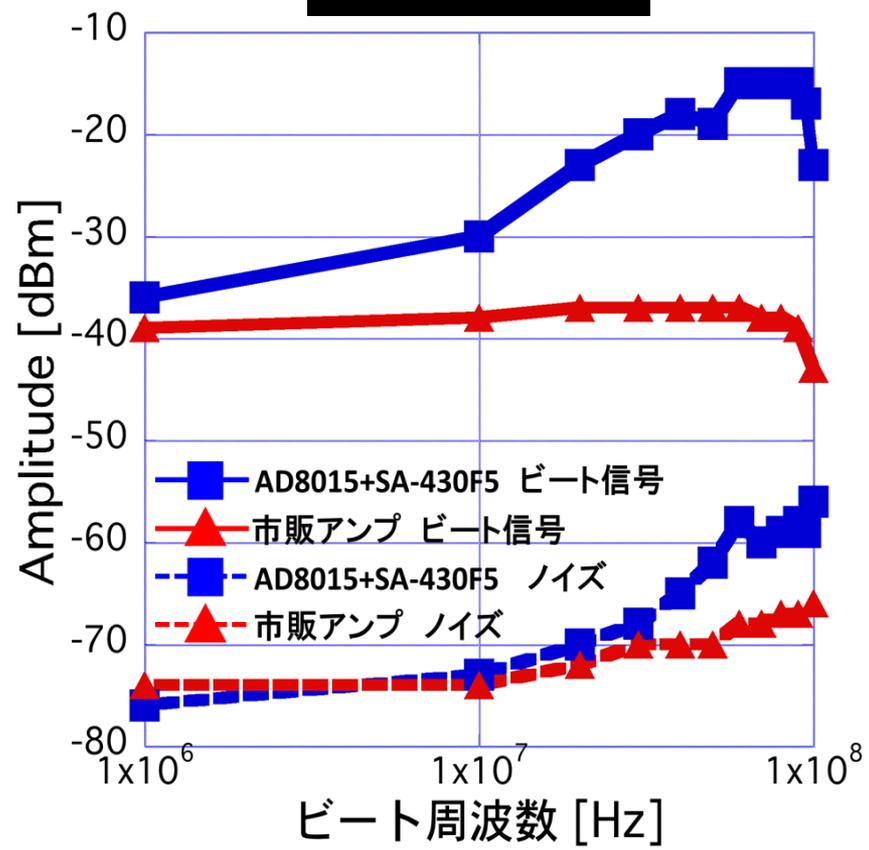


AD8015

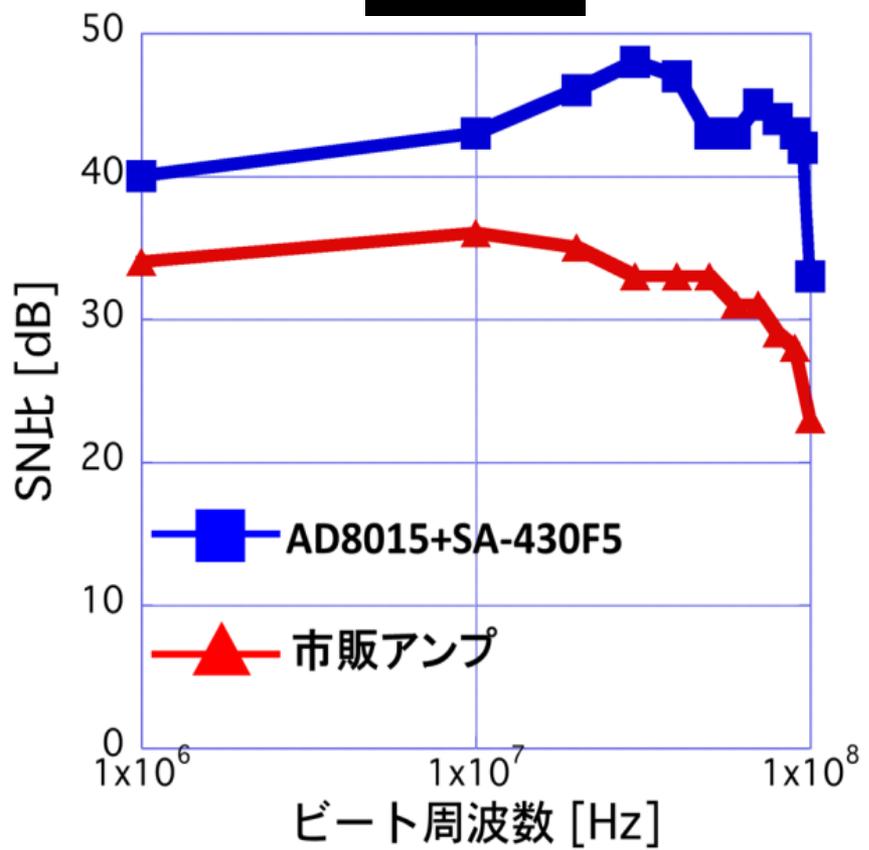


実験結果：信号強度とSN比

信号強度



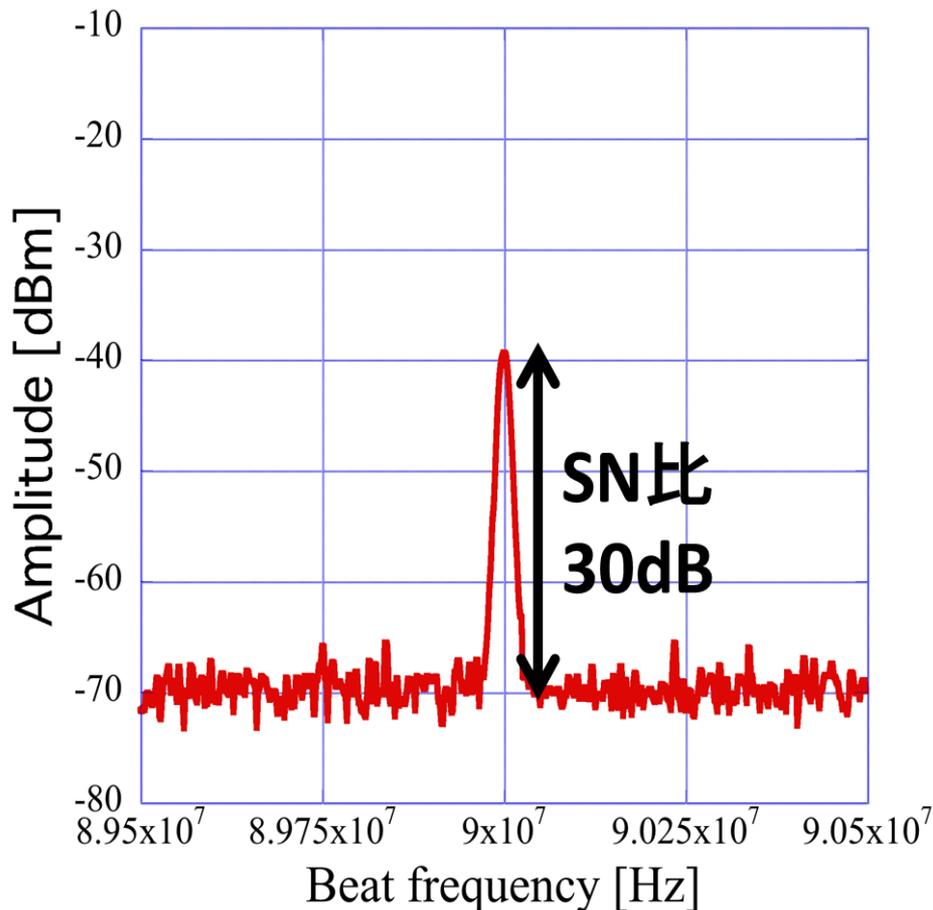
SN比



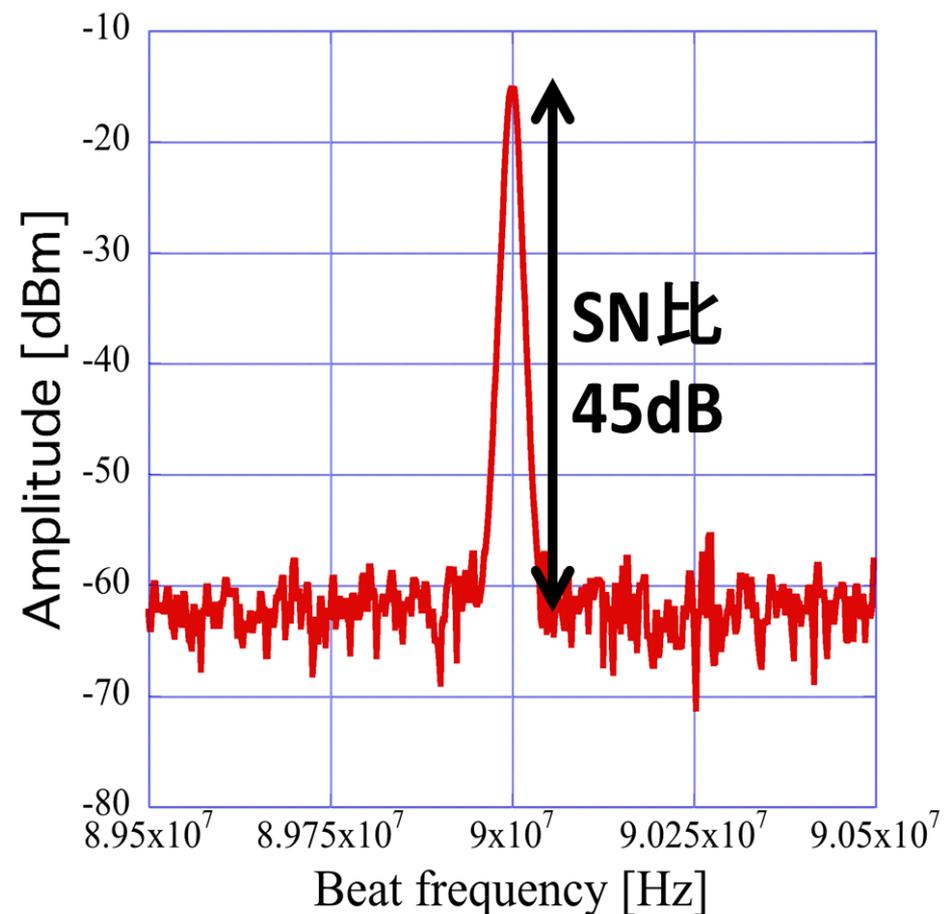
**市販品(帯域100MHz,ゲイン50kΩ)に比べ
5~15dB検出感度を向上**

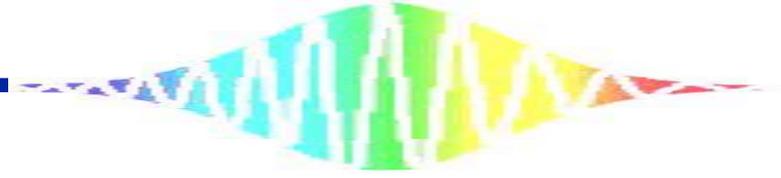
実験結果：ビート信号スペクトル (ビート周波数90MHz)

PCA + 市販カレント・プリアンプ



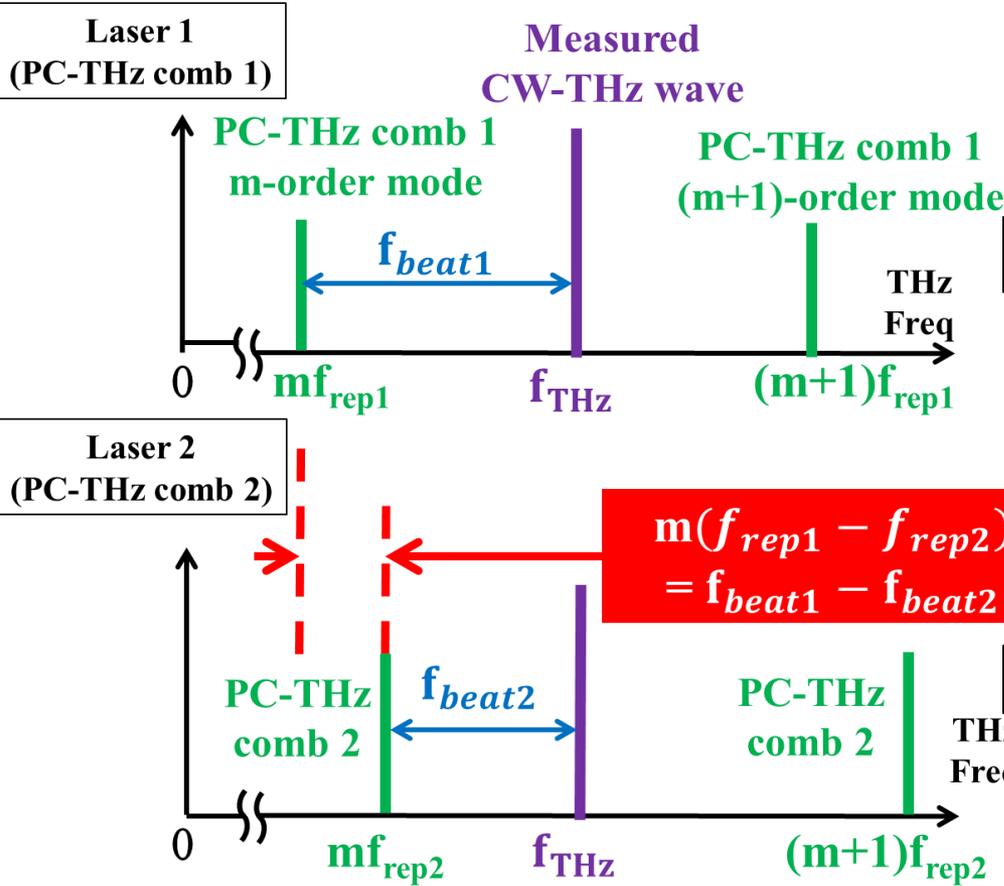
PCA・アンプ複合モジュール





② デュアルPC-THzコムを用いたリアルタイム絶対周波数計測

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！

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

周波数カウンタで測定する場合、

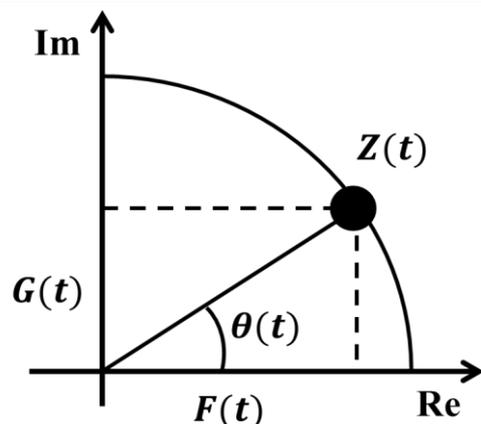
(1)ゲート時間の制限があり速い現象が計測できない

(2)高い信号SN比が必要

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



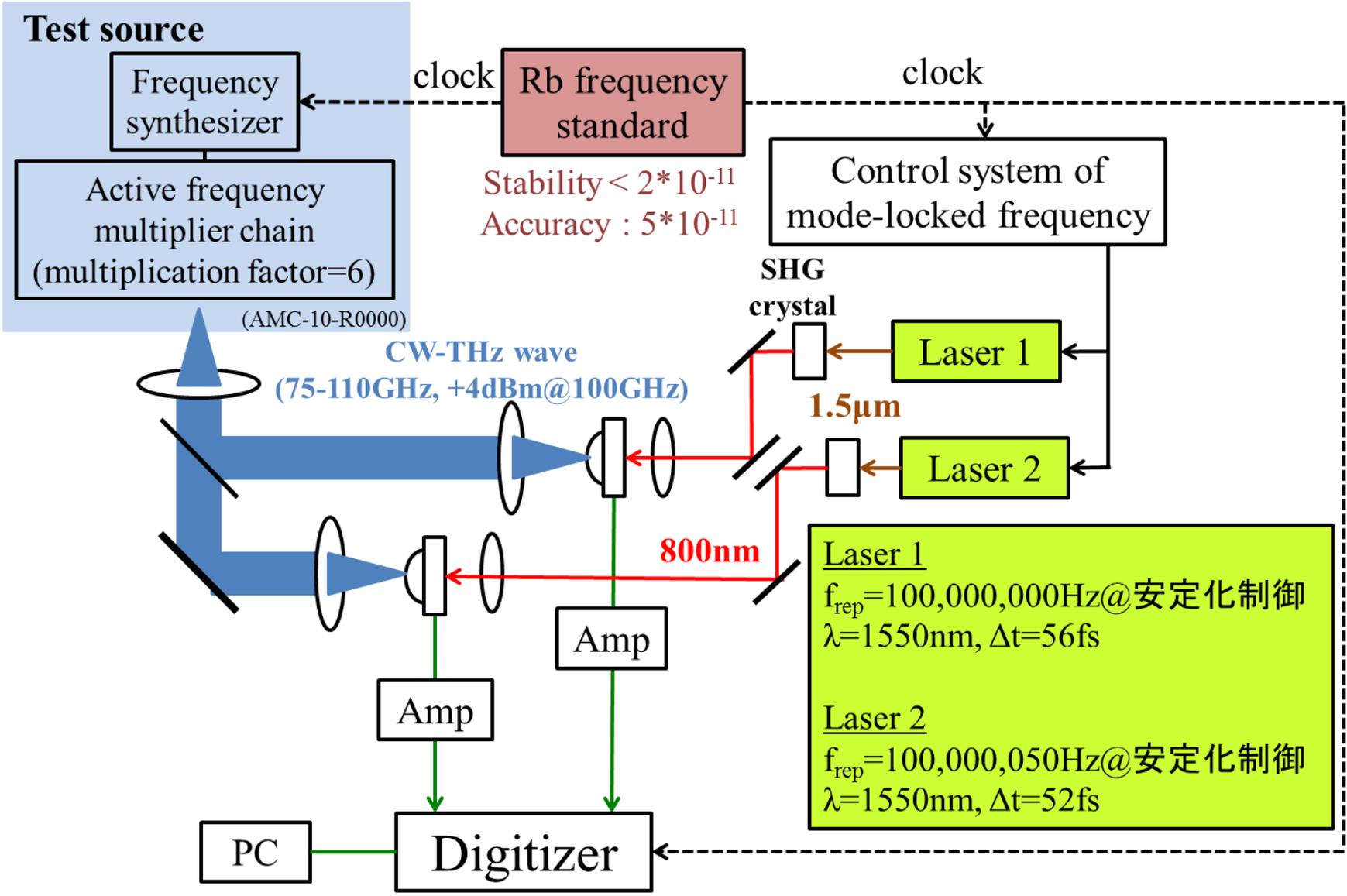
$Z(t) = F(t) + iG(t)$ と表される

$$\theta(t) = \arg[Z(t)] = \tan^{-1} \left[\frac{G(t)}{F(t)} \right]$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\theta(t)}{dt}$$

これにより求まる瞬時位相を微分することで,
 f_{beat1} , f_{beat2} の瞬時周波数を算出することが可能!

実験セットアップ



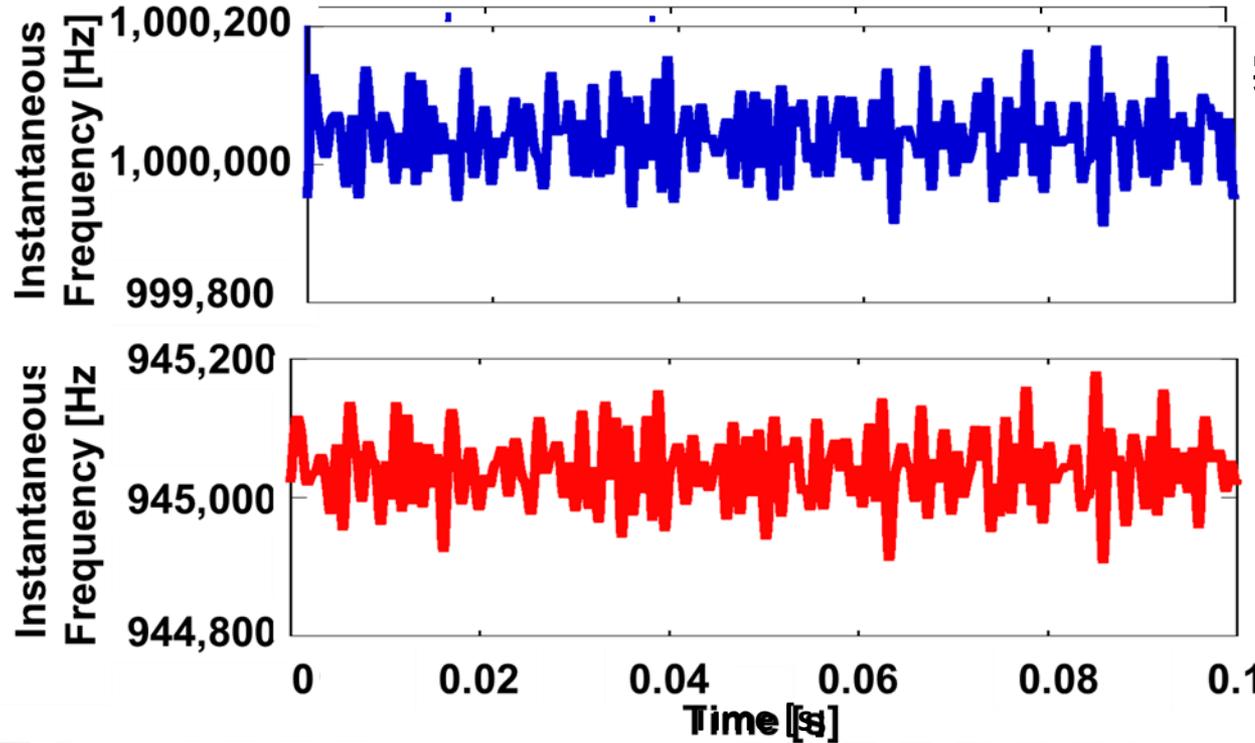


ビート周波数とCW-THz波の測定結果

f_{beat1}

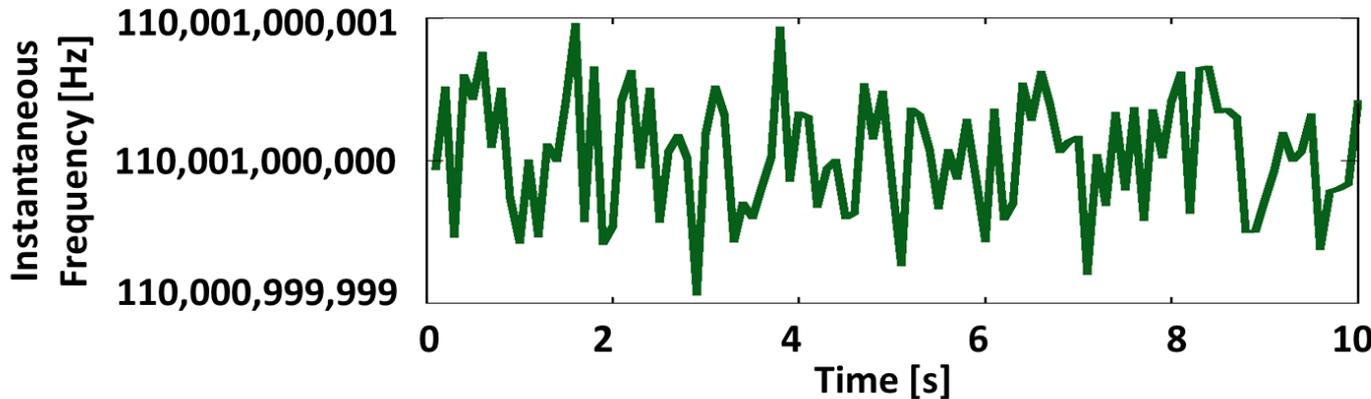
デジタルの
サンプリングレート
10MHz

f_{beat2}



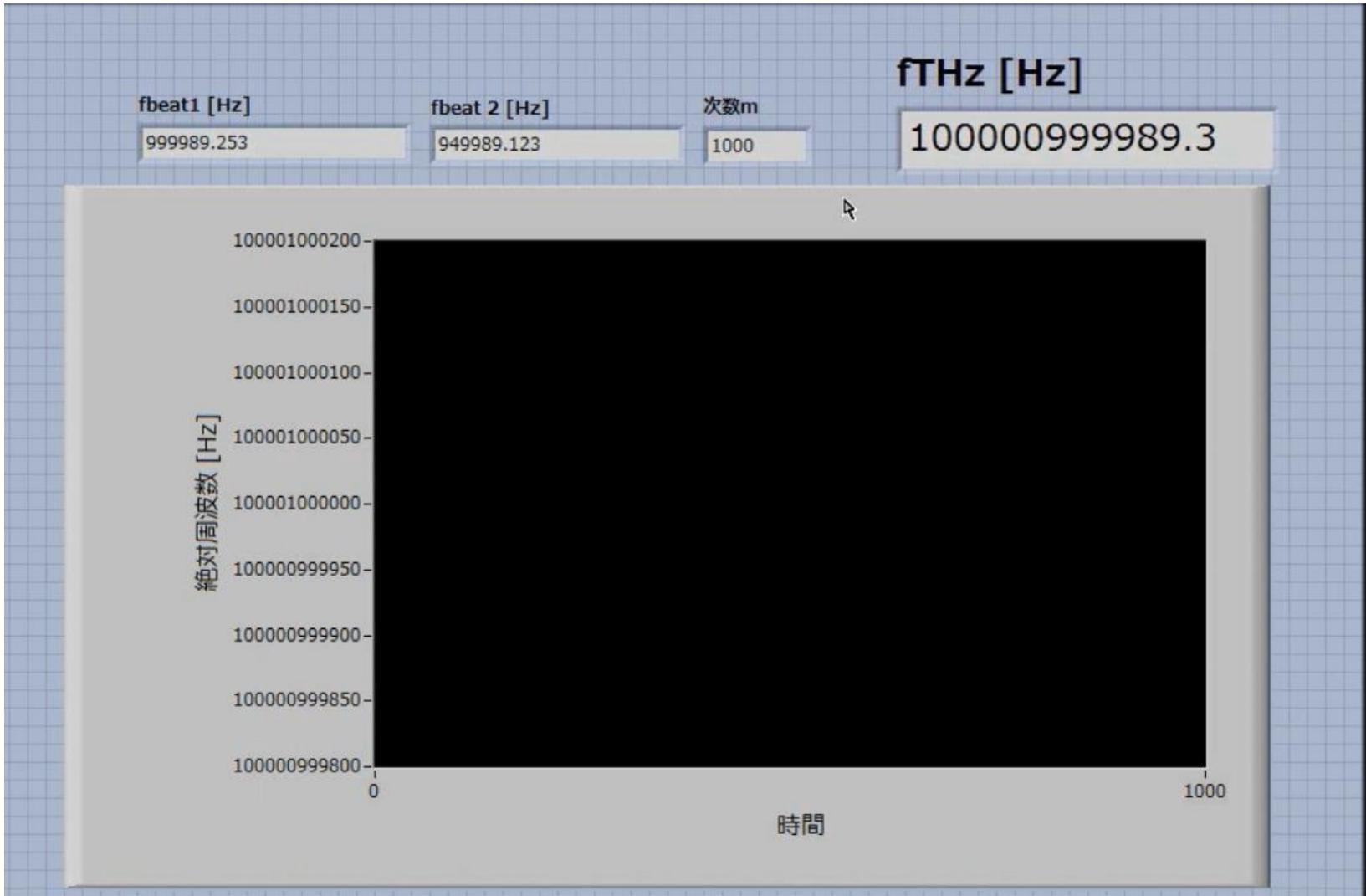
- 実験条件
- ・ 100ms計測
 - ・ 積算100

f_{THz}



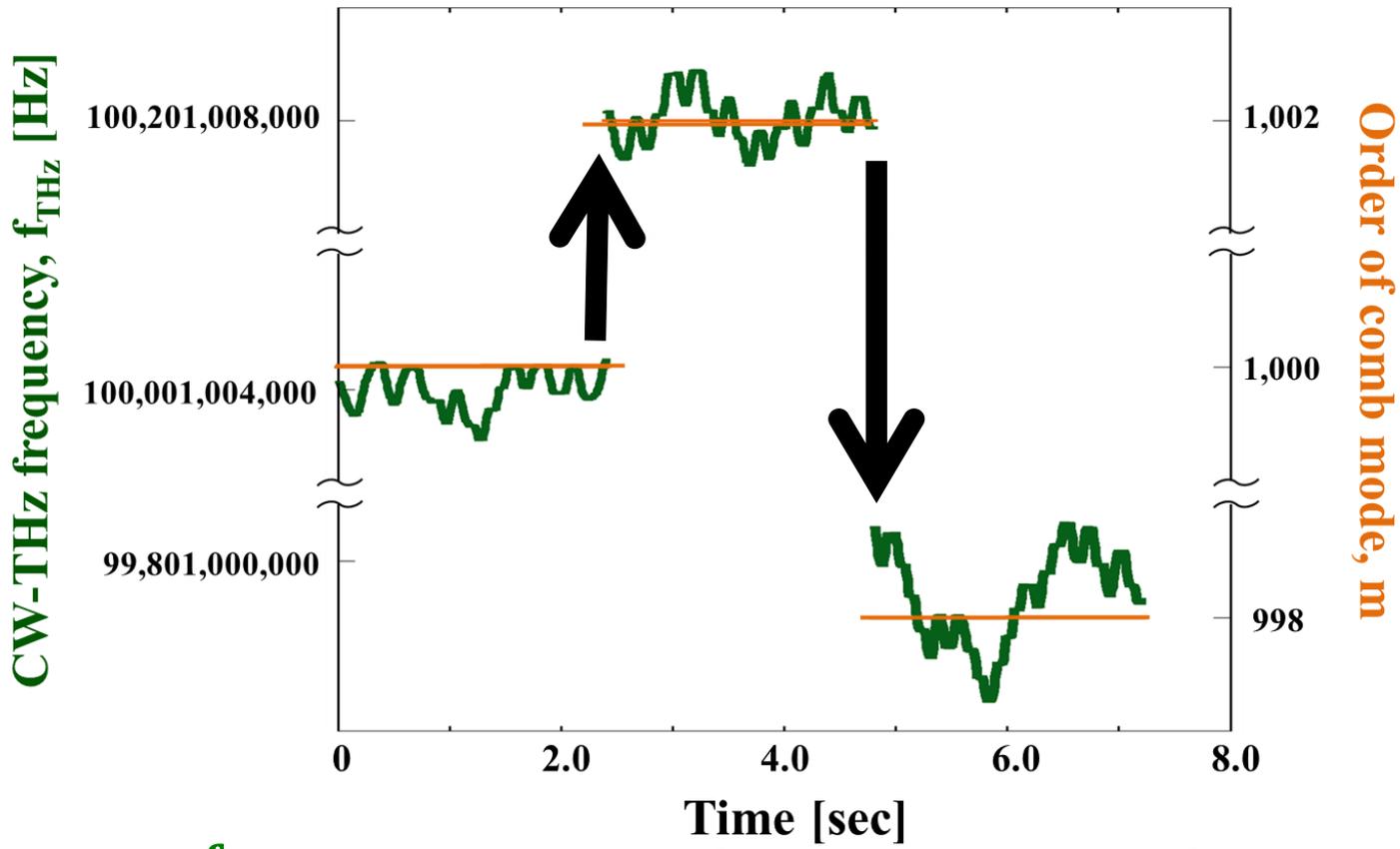
CW-THz波のリアルタイムモニタリング①

(周波数変動=0.1THz±100Hz)



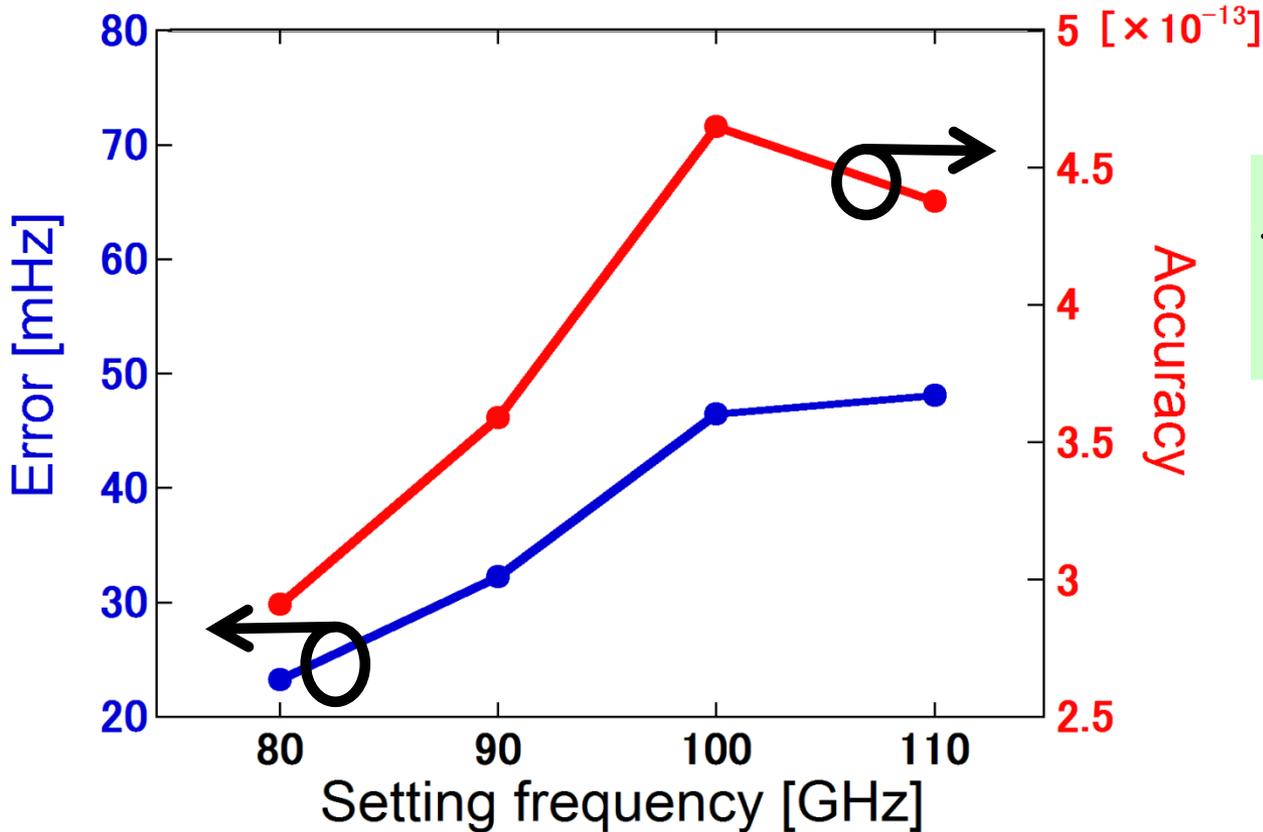
CW-THz波のリアルタイムモニタリング②

(周波数変動=0.1THz±200MHz)



コムモード次数が変わるような大きな周波数変化 (モードホップなど)もリアルタイムで計測可能!

絶対周波数計測の実験精度



測定誤差の見積もり

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

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

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

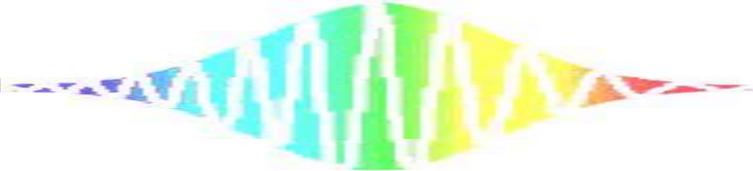
$$\Delta f_{beat1} = 21\text{mHz}$$

$$m = 800 \sim 1100$$



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

本実験での平均精度 = 3.9×10^{-13}

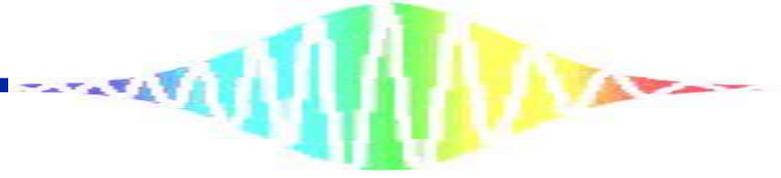


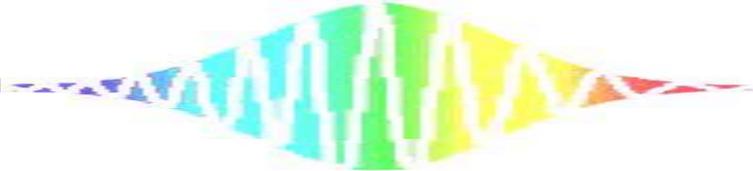
まとめ

- ① **小型PCA・アンプ複合モジュール**を作製し、市販品よりも高SN特性を実現
- ② 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



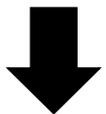


背景

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

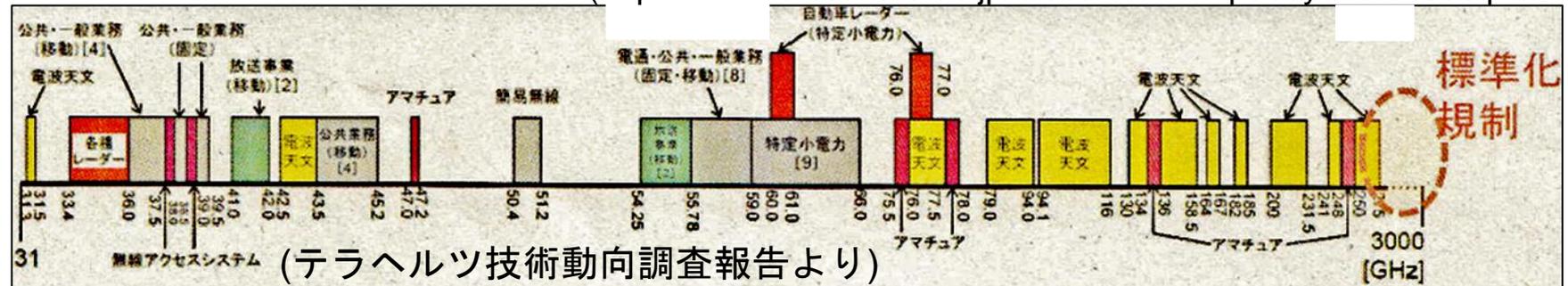
テンポラリなネットワーク

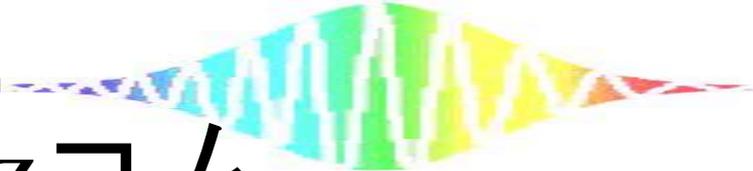


ホットスポット、レンタルDVDショップ



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



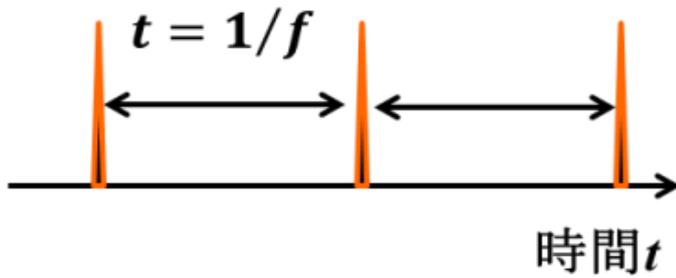


光コムとTHzコム

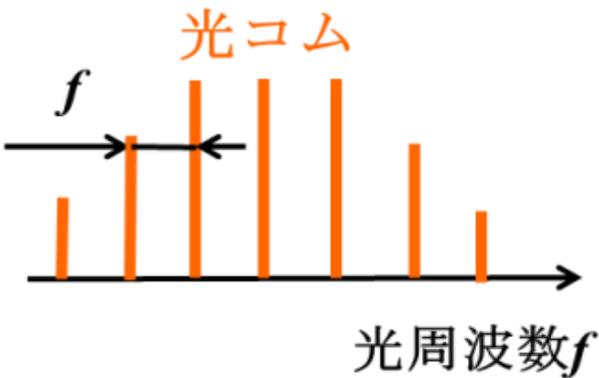
時間領域

周波数領域

モード同期超短パルス列

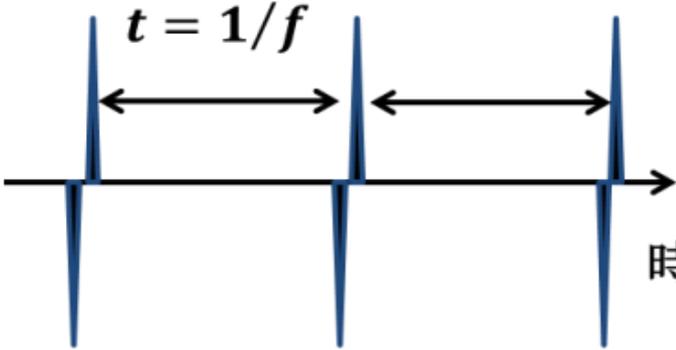


フーリエ変換

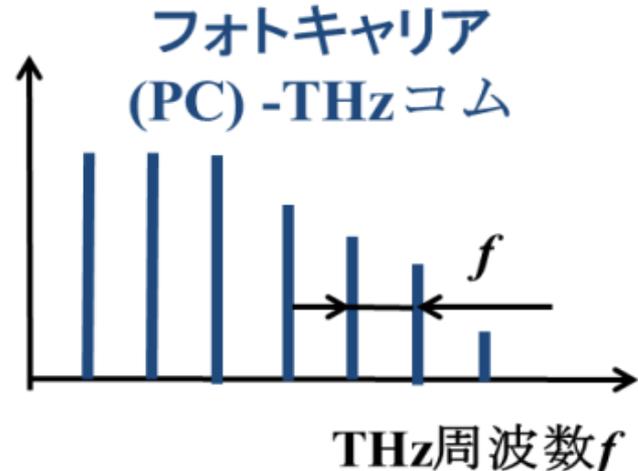


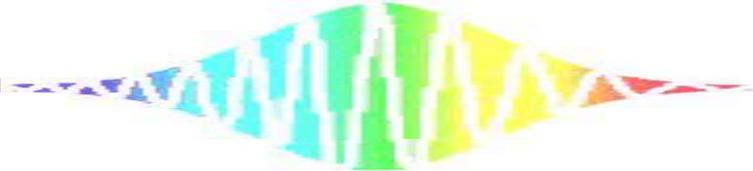
THz検出用PCAに入射すると

ピコ秒モード同期パルス列



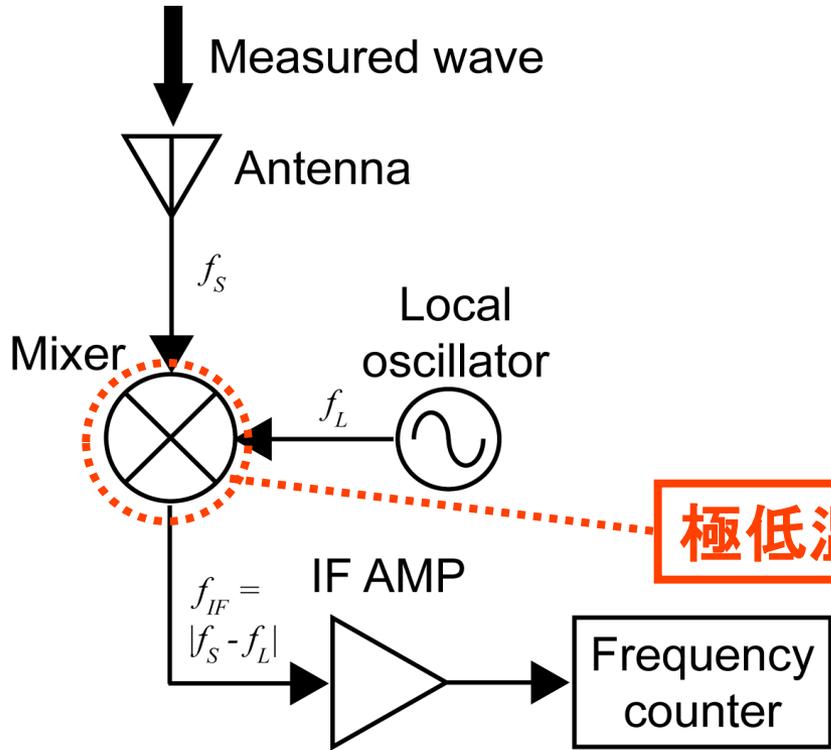
フーリエ変換



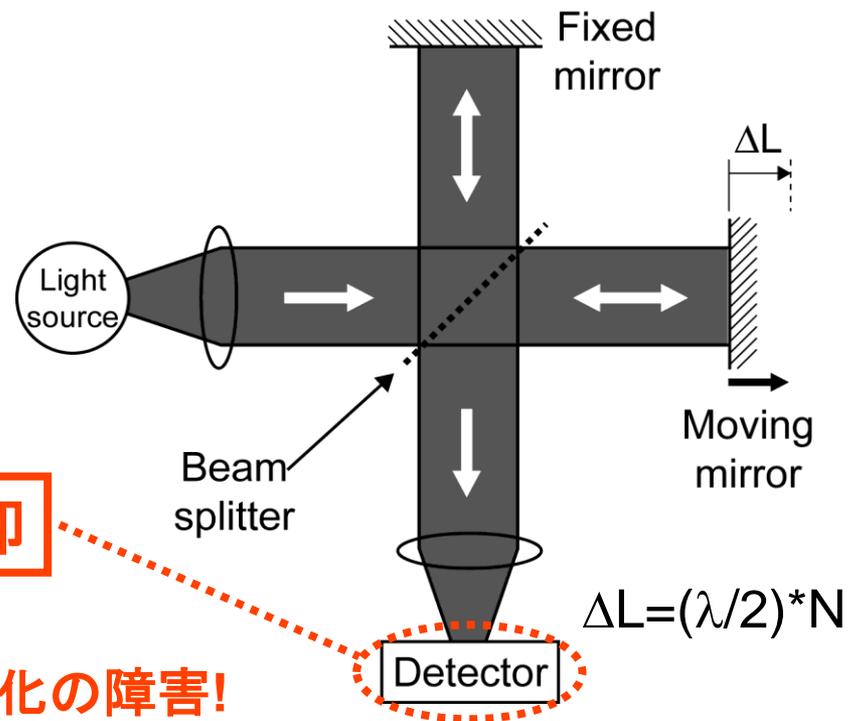


従来法

電氣的ヘテロダイナ法



光學的手法 (干渉計測)

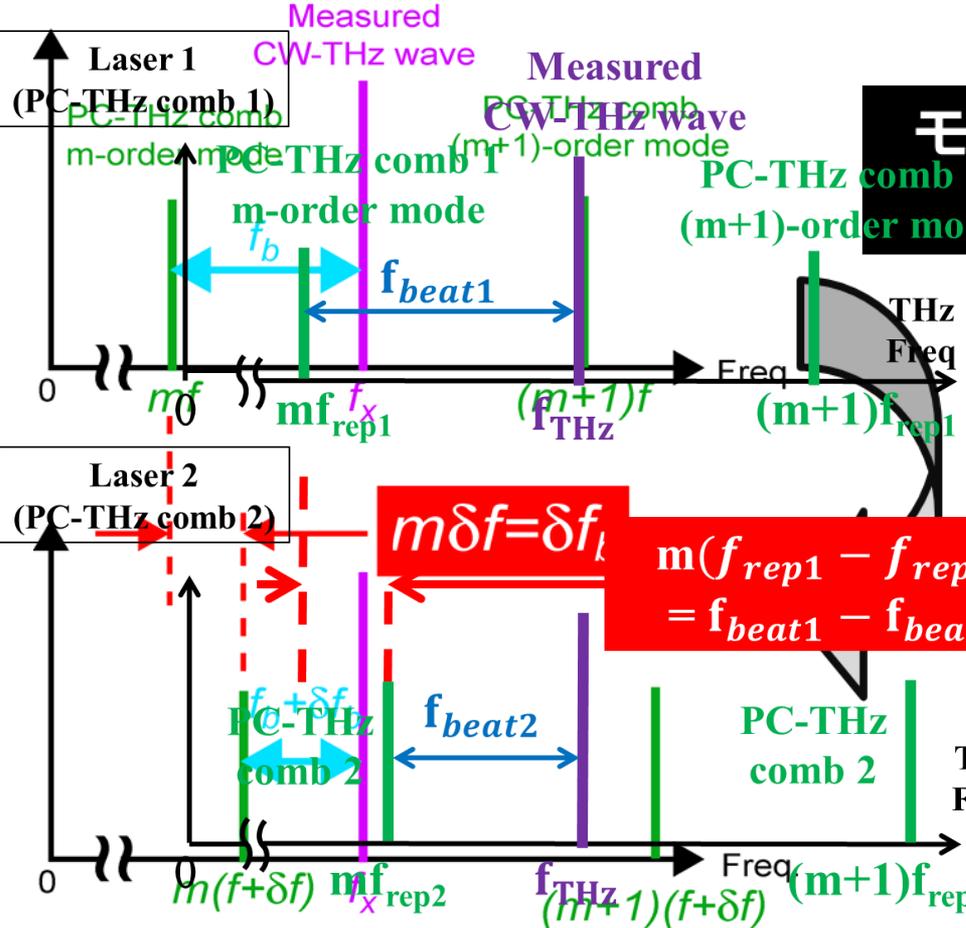


極低温冷却

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!

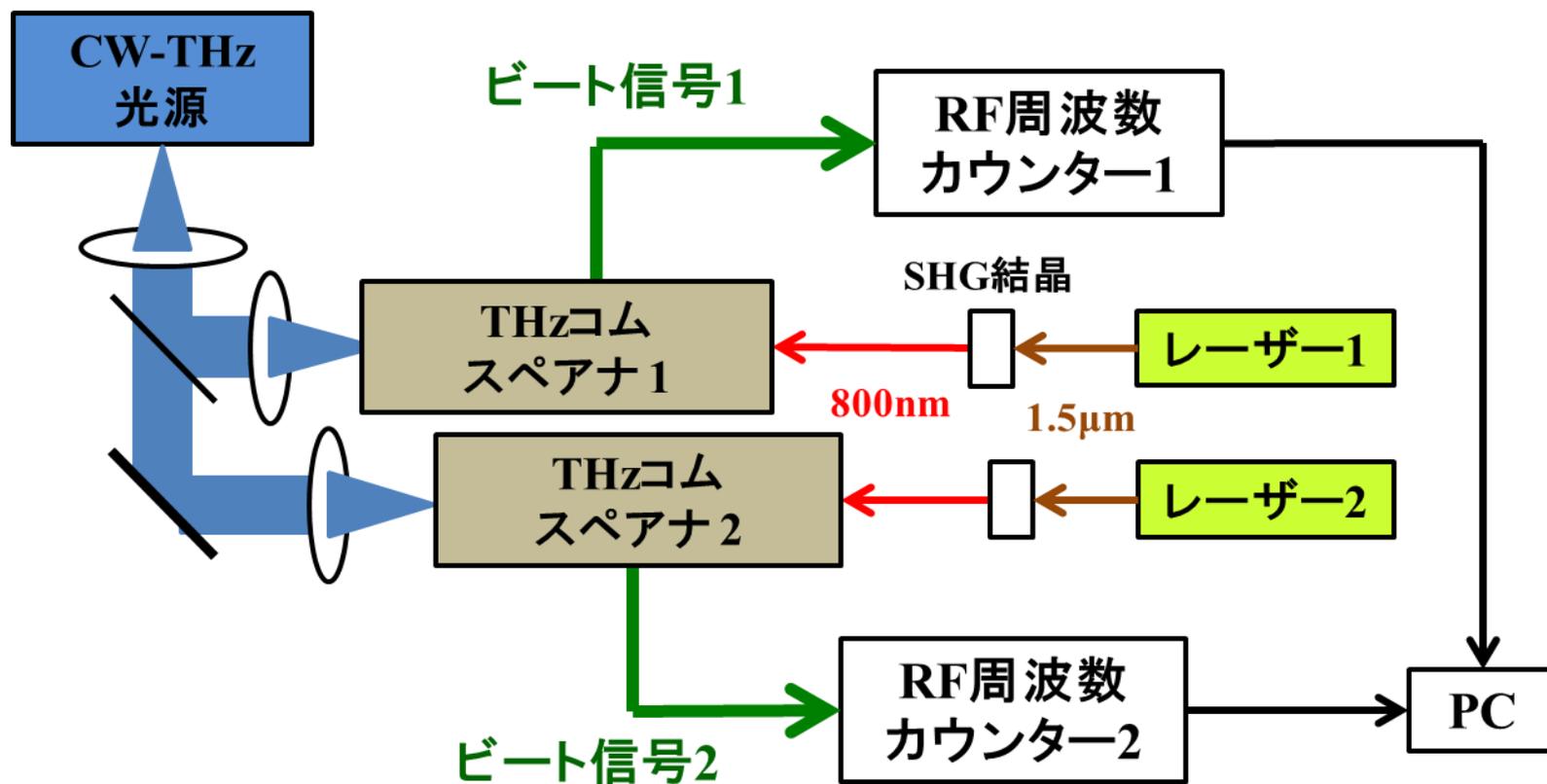
リアルタイムでの絶対周波数の決定法



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)

従来は

それぞれの f_{beat} を周波数カウンターで計測
→その値をPCに取り込み絶対周波数を取得



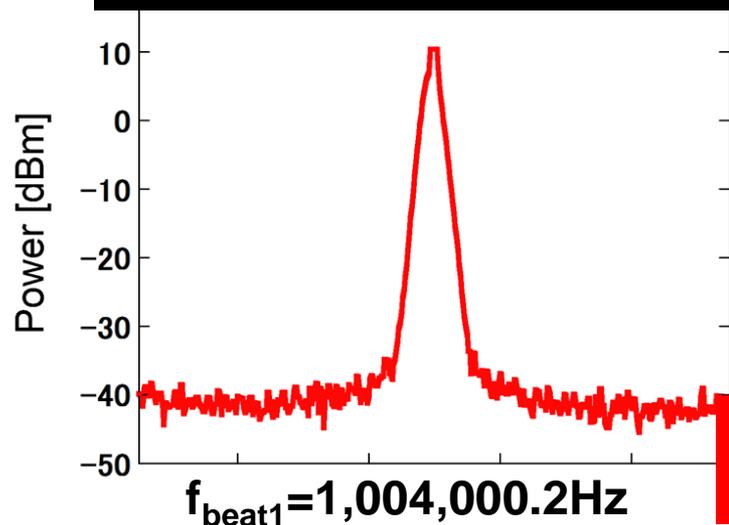
周波数カウンターを利用すると高速計測が困難

CW-THz波と2つのPC-THzコム間のビート信号

PC-THzコム (1)

($f_{\text{rep1}} = 100,000,000 \text{ Hz}$)

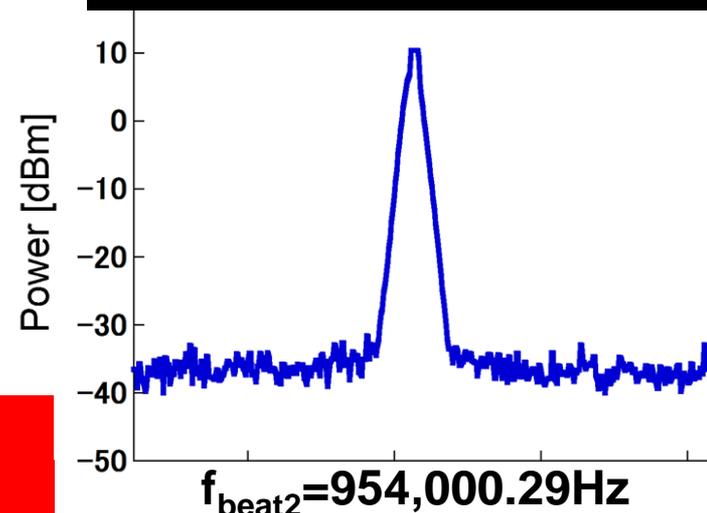
@安定化制御



PC-THzコム (2)

($f_{\text{rep2}} = 100,000,050 \text{ Hz}$)

@安定化制御



リアルタイム ↓ で決定出来る!

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

$$= |1,004,000.2 - 954,000.29| / |100,000,000 - 100,000,050| = 1000$$

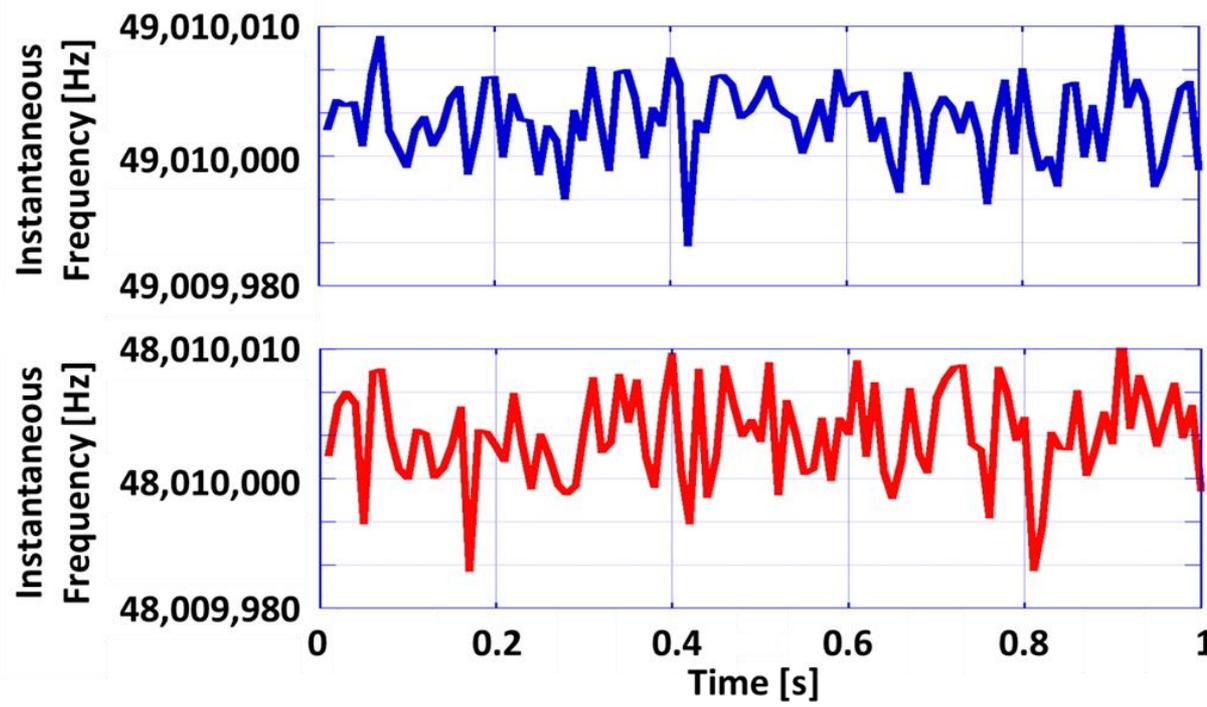
$$f_{\text{THz}} = m f_{\text{rep1}} + f_{\text{beat1}} = 1000 * 100,000,000 + 1,004,000.2 = 100,001,004,000 \text{ Hz}$$



ビート周波数とCW-THz波の測定結果

f_{beat1}

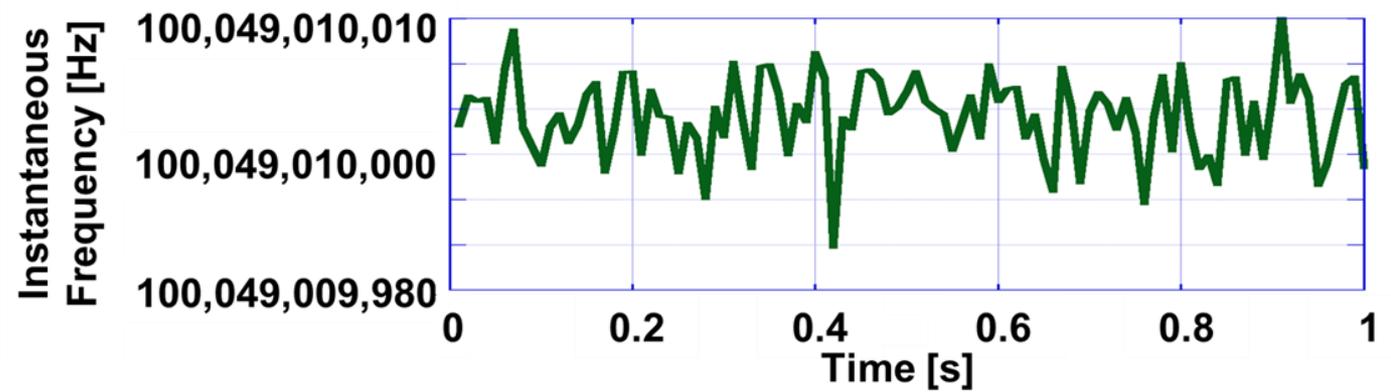
デジタルサイザの
サンプリングレート
100MHz

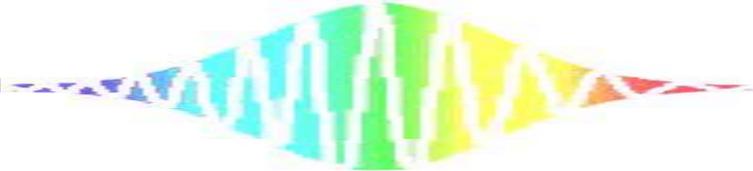


実験条件

- ・ 10ms計測
- ・ 積算100

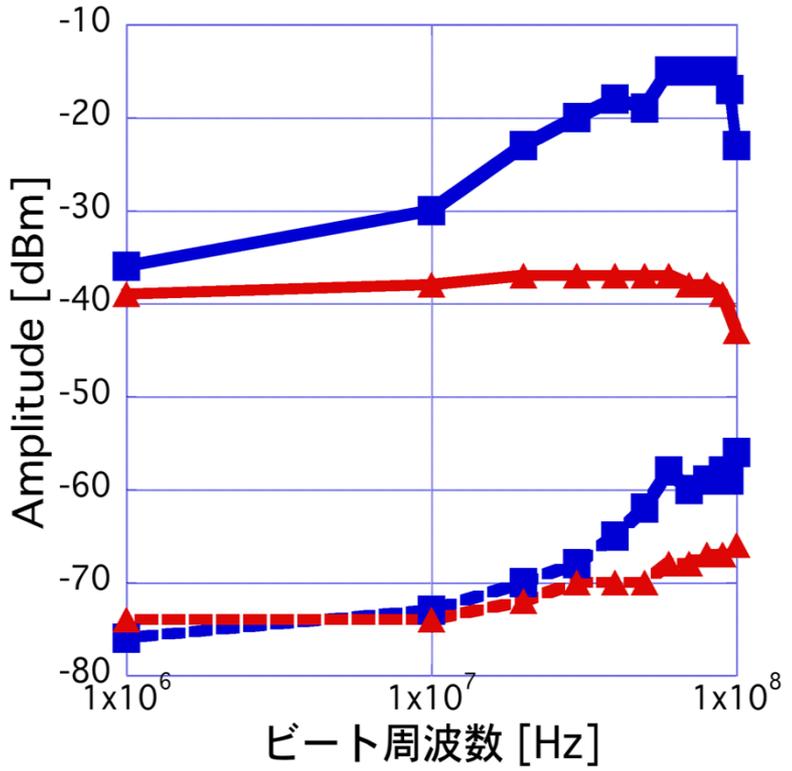
f_{THz}





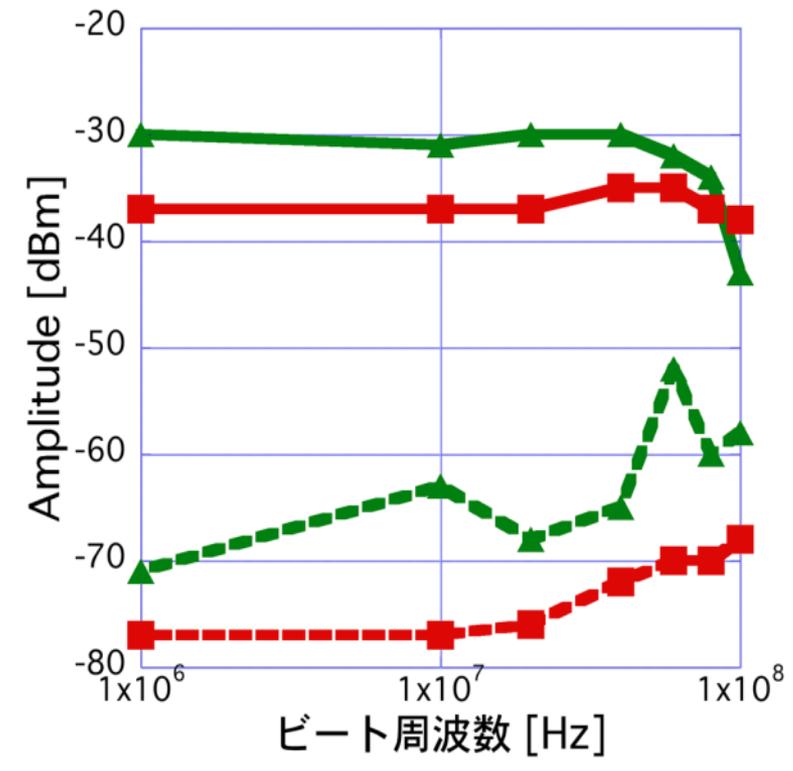
信号強度比較

- AD8015+SA-430F5 ビート信号
- ▲ 市販アンプ ビート信号
- AD8015+SA-430F5 ノイズ
- ▲ 市販アンプ ノイズ



組み込み型

- 市販アンプ ビート信号
- ▲ AD8015+SA-430F5() ビート信号
- 市販アンプ ノイズ
- ▲ AD8015+SA-430F5() ノイズ



外付け型