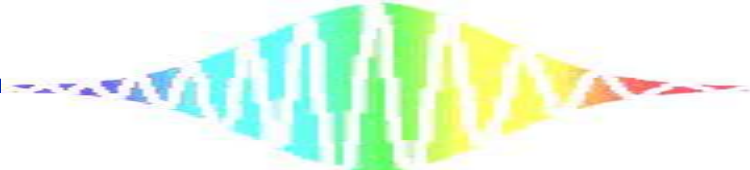


High-precision frequency measurements
in the THz spectral region
using an unstabilized femtosecond laser
「非安定化フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ
領域での高精度周波数測定」

Heiko Fuser, Rolf Judaschke, and Mark Bieler
Applied Physics Letters 99,121111(2011)

2012/6/27 B4 林建太



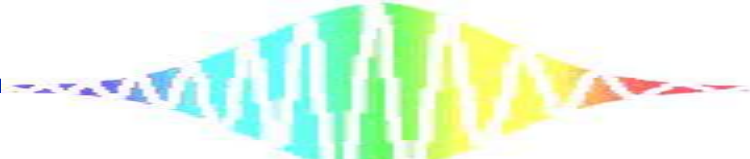
背景

近年THz波が、センシングや通信のための新しい手段として現れた

- THz指紋スペクトル
 - ブロードバンド無線通信のキャリア
- ⇒THz周波数標準の整備が望まれている

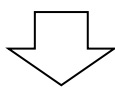
さらに、実用的CW-THz光源(THz-QCL,UTC-PDなど)の出現

⇒CW-THz波の精密周波数計測に関する要求も高まっている



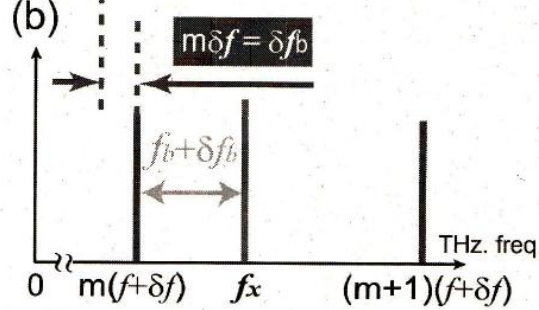
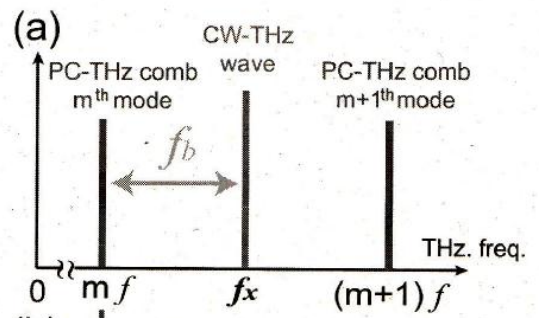
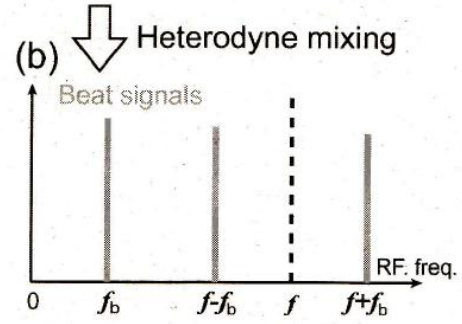
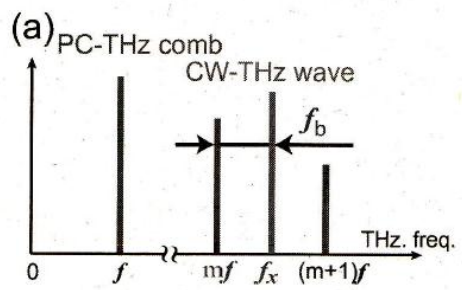
THzコムを用いたCW-THz絶対周波数測定

PC-THzコムが生成されたPCA内にCW-THz波を入射



ビート信号の周波数 $f_b = |m \cdot f - f_x|$

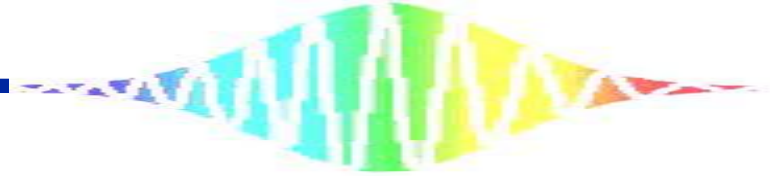
ここで、共振器長をわずかに変化($f + \delta f$)させるとビート周波数は $f_b + \delta f_b$ に変化する



$$m\delta f = \delta f_b$$

これによりmが決まるので絶対周波数が測定できる

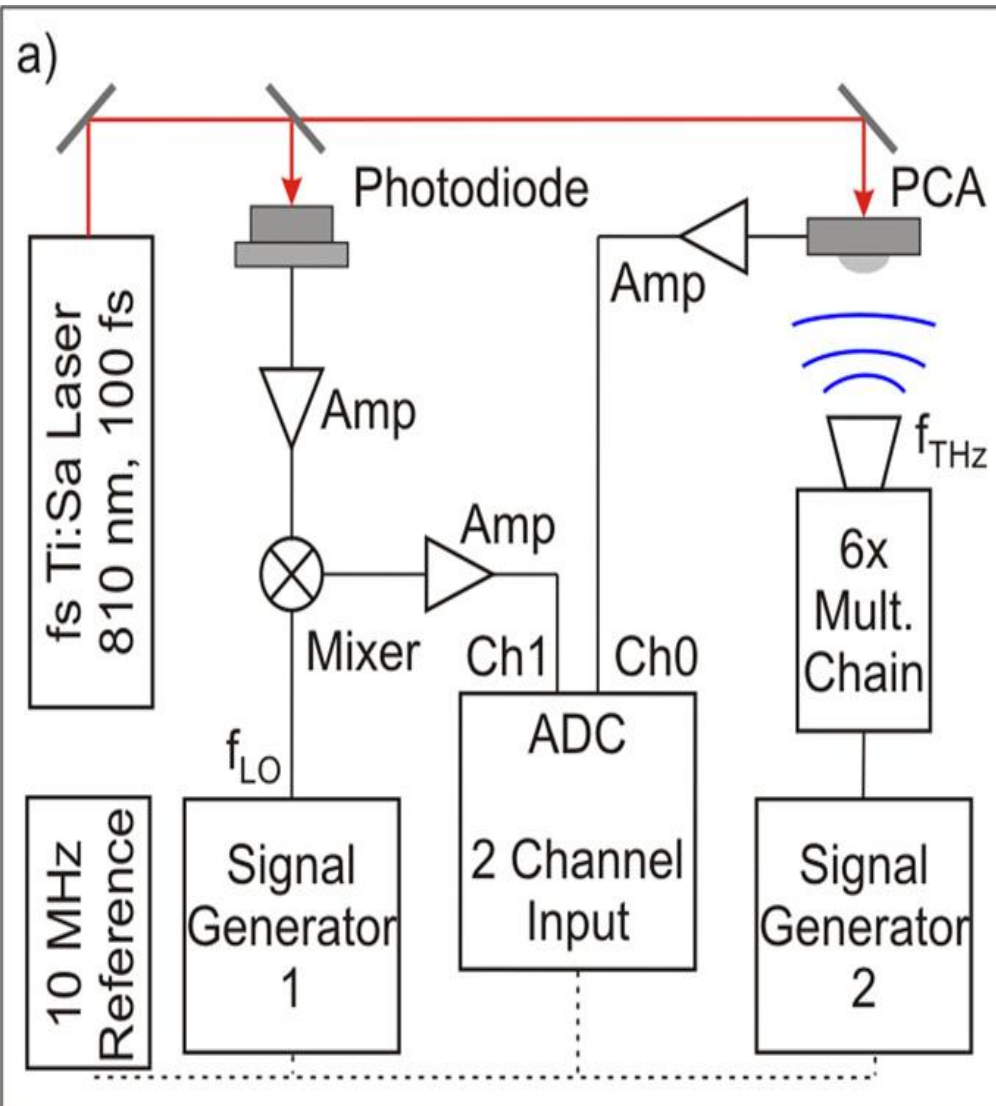
(周波数精度 10^{-11})



本論文では

- 安定化していないフェムト秒レーザーを使って自由空間テラヘルツ放射の高精度周波数測定を行う。
- レーザーの繰り返し周波数が変動するためテラヘルツ測定値を補正して、周波数精度をよくする

セットアップ



- Ti:Saレーザー
(繰り返し周波数 ~ 76 MHz、パルス幅100fs、中心波長810nm、スペクトル幅20nm)
 \Rightarrow 安定化なし
- 局部発振器
(周波数 $f_{LO}=3.4961$ GHz)

非安定化レーザーを用いることによる問題点

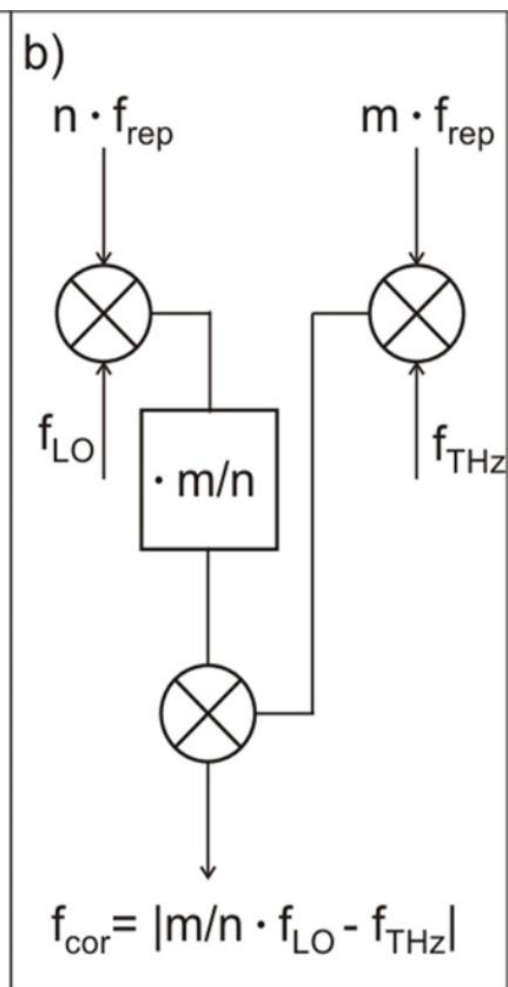
- ・ レーザーの共振器長は熱効果が原因で変化
最大の原因⇒スペーサーの熱膨張

これにより、レーザーの繰り返し周波数も変動する

$$f_{b, \text{THz}} = |m \cdot f_{\text{rep}} - f_{\text{THz}}|$$

よって、 $f_{b, \text{THz}}$ の測定に強い影響を及ぼす

解決策



最も低い周波数でのビート信号

フォトダイオード信号の n 番目のコムラインと
局部発振器とのミキシング

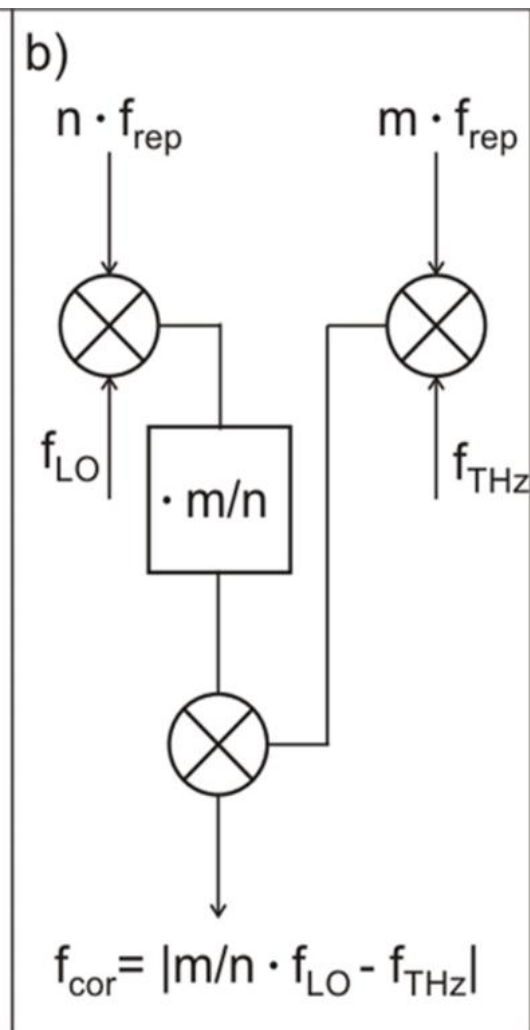
$$f_{b,rep} = |n \cdot f_{rep} - f_{LO}|$$

測定ビート信号の最低周波数成分

入力cw-THz波と最も近く (m 番目)のコムライン
間の周波数差

$$f_{b,THz} = |m \cdot f_{rep} - f_{THz}|$$

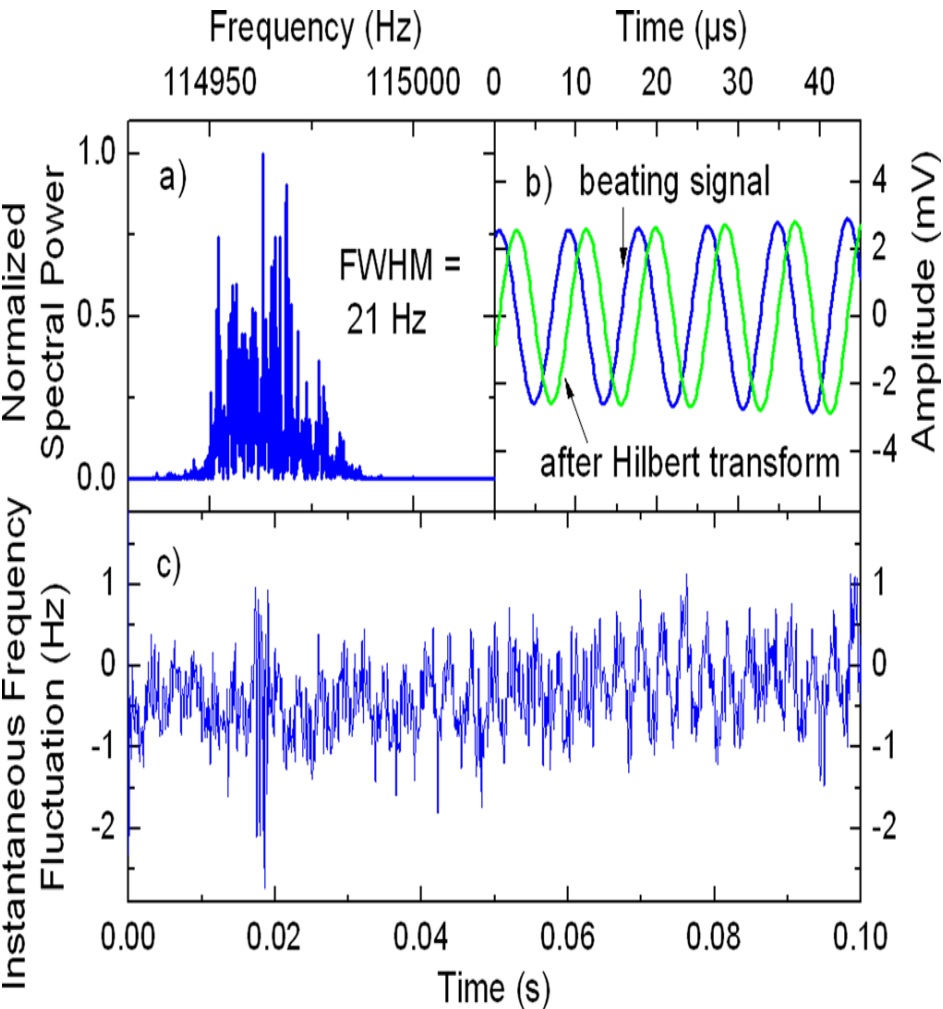
解決策



$$\begin{aligned}
 & |m/n \cdot f_{b,rep} \otimes f_{b,THz}| \\
 = & |m \cdot f_{rep} - m/n \cdot f_{LO}| - |m \cdot f_{rep} - f_{THz}| \\
 = & |m/n \cdot f_{LO} - f_{THz}|
 \end{aligned}$$

繰り返し周波数は相殺されたので、
レーザーを安定化しなくても高精度な
CW-THzの周波数測定が可能

実験結果①



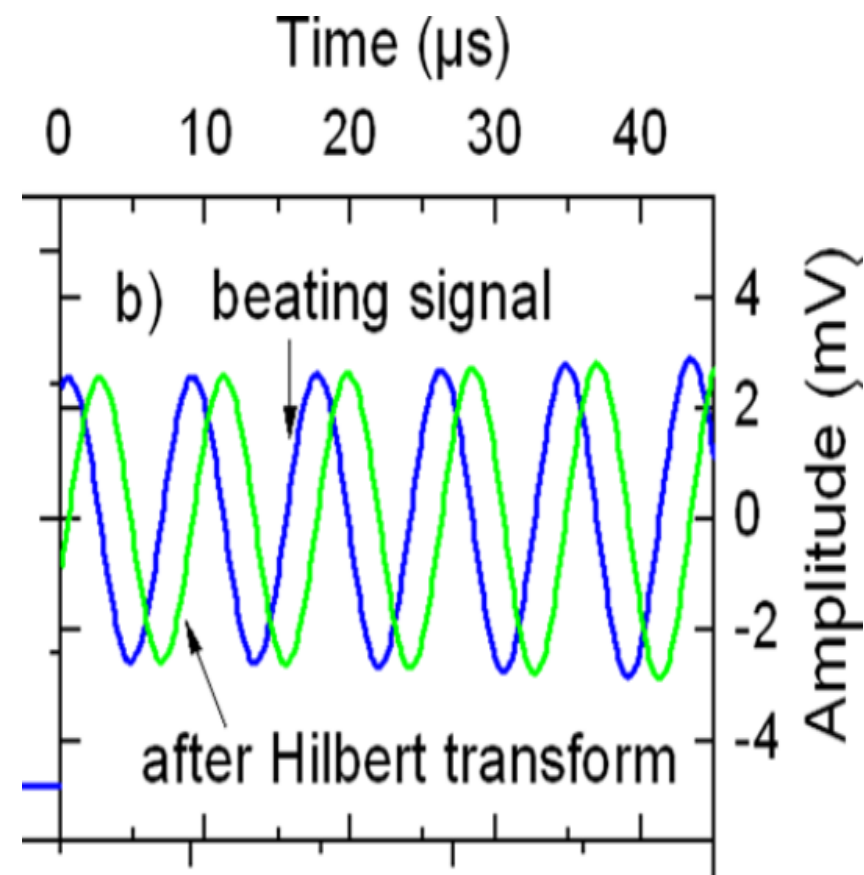
- ビート $f_{b,rep}$ の正規化スペクトルパワー

(f_{rep} の第46高調波と周波数 $f_{LO}=3.4961$ GHz)

- (c) でみられる速い変動はモードロック Ti:Sa レーザーの技術的かつ基本的なノイズが原因

実験結果①補足

- 基準信号(実数部)と90°シフトされた信号(虚数部)で構成された時間領域信号



繰り返し周波数の瞬間周波数

$$f_{i,\text{rep}} = |f_{i,\text{beat}} - f_{\text{LO}}|/n$$

$f_{i,\text{beat}}$ は求めることができる

$$f_{i,\text{beat}} = 1/(2\pi) d\arg[z(t)]/dt$$

$\arg[z(t)]$ が位相なので計算によって求まる

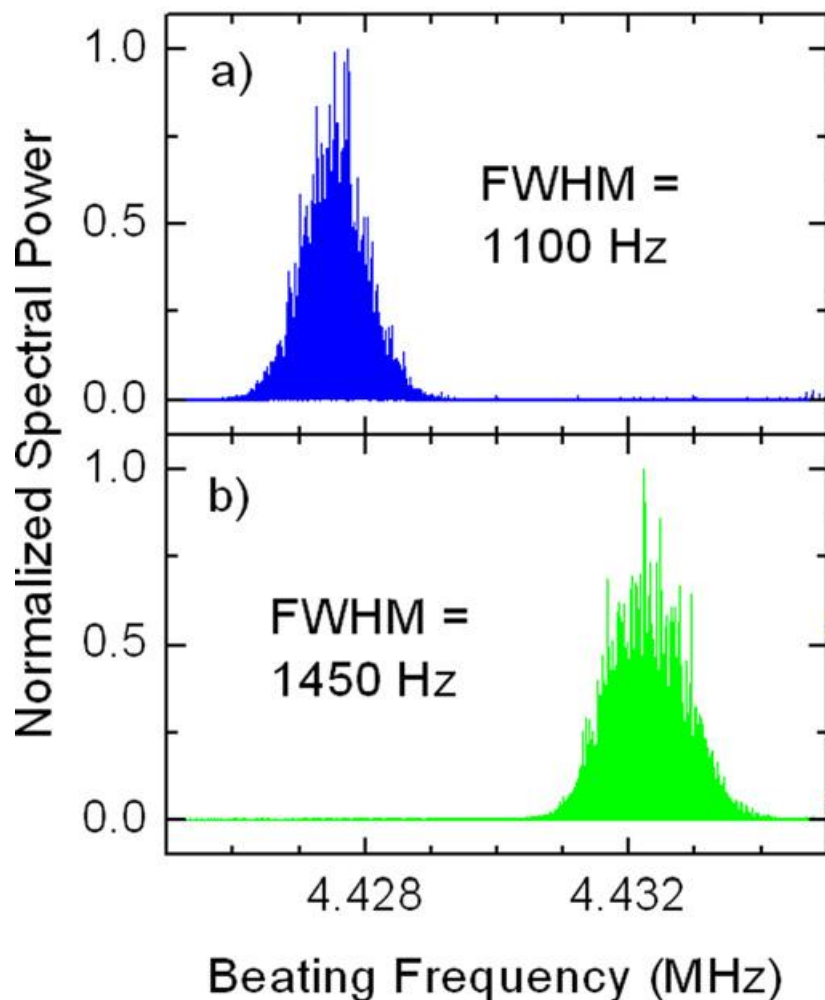
実験結果②

- THzビート信号

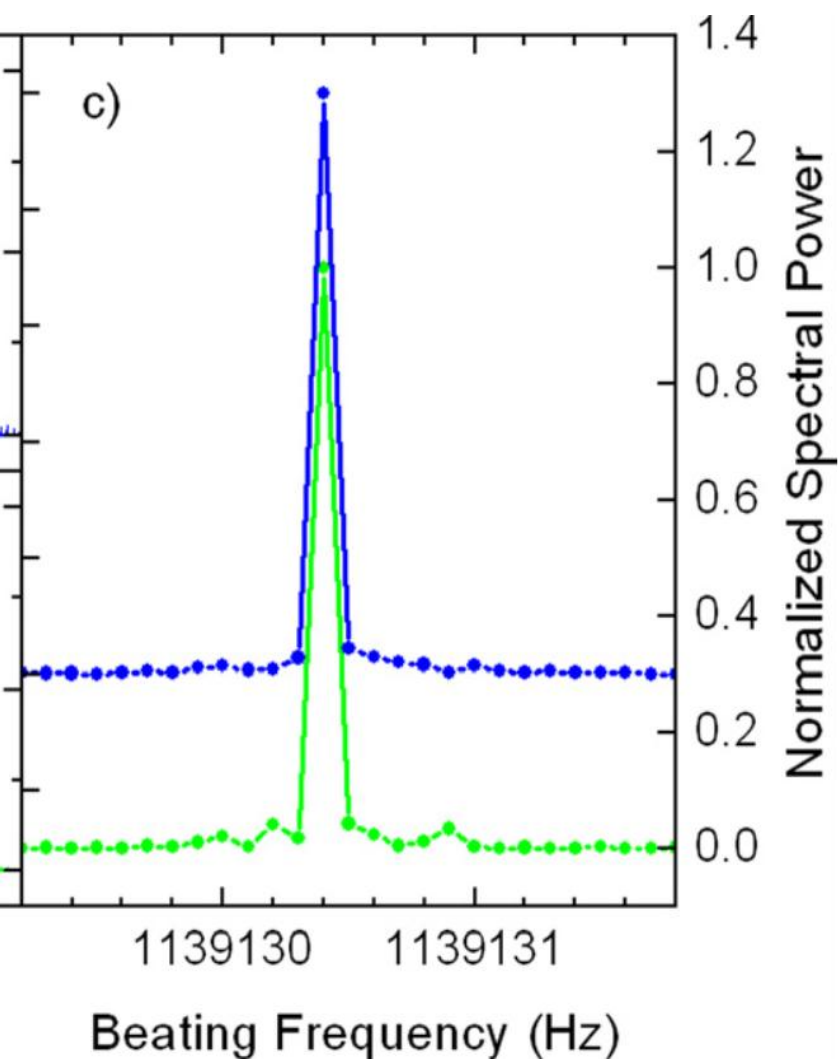
$$f_{b,THz} = |m \cdot f_{rep} - f_{THz}|$$

($f_{THz} = 100.02 \text{ GHz}$ 、1316番目のコムラインの間でビートが生じるように示される)

m の値が大きいため f_{rep} の変動の影響が強い



実験結果③

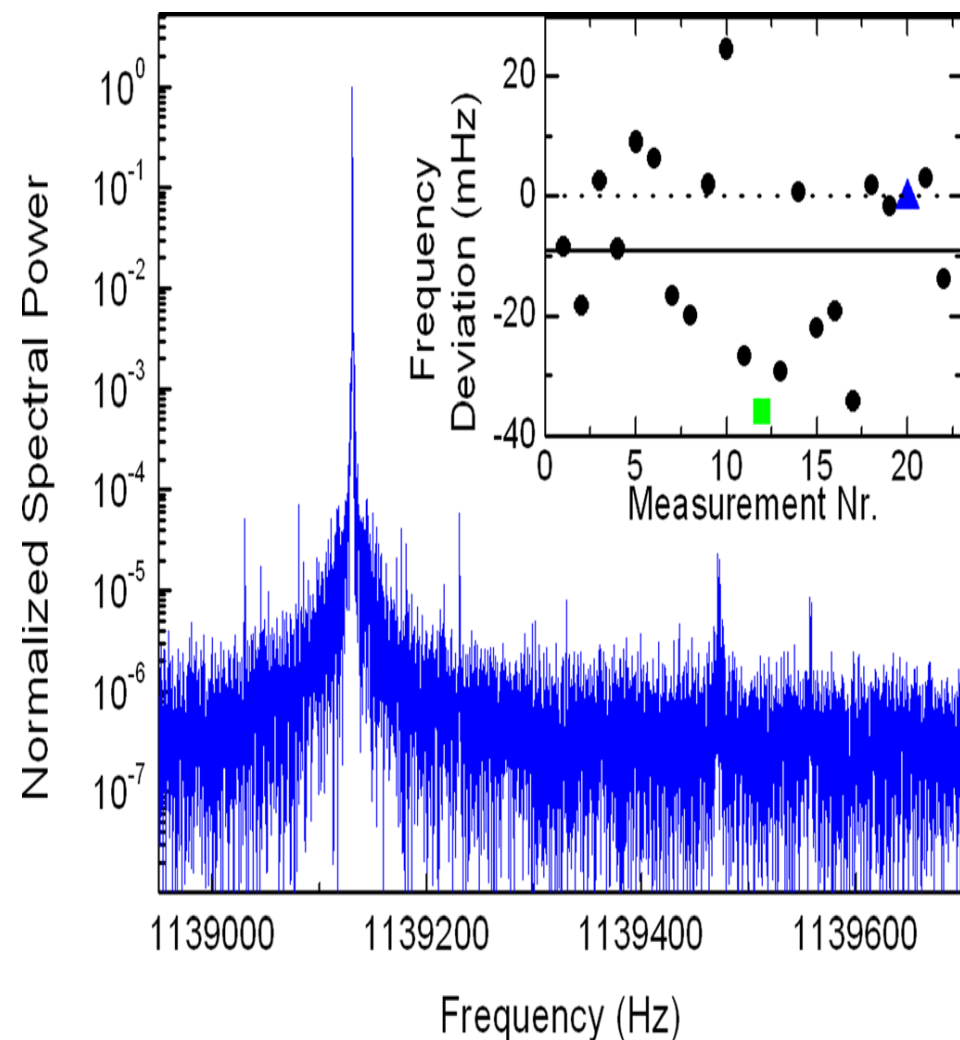


- 補正テラヘルツビート信号の正規化パワースペクトル

他の固有ノイズ信号と同様に高次ミキシング産物を抑制するためのGaussianフィルター(幅 $>20\text{kHz}$)を用いる

実験結果②と比べて両方の場合で、 0.1Hz より下の半値全幅が得られている

実験結果④

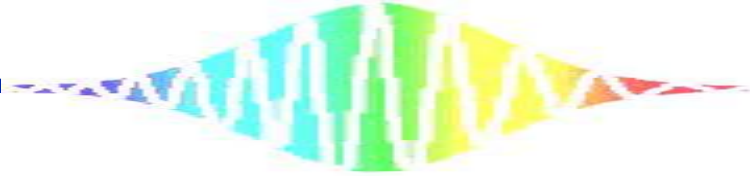


- 図3(c)の上側曲線の片対数スケールのプロット

約60dBのSN比を可視化することが出来る

- 挿入図は自由空間CWテラヘルツ放射の出力周波数100.02GHzからの偏差を示す

$(9 \pm 3) \cdot 10^{-14}$ の測定デバイス相対的確度を達成



結論

- 測定テラヘルツ信号を補正し、 9×10^{-14} の測定精度を達成
- 今回の方法では追加デバイス(スペクトラムアナライザー、周波数カウンタ、ミキサ、位相ロックループなど)は使う必要がなく、実験セットアップを簡単にする