

# 光コムテラヘルツモード間光ビート を用いた距離計測

横山修子<sup>1)</sup>，安井武史<sup>2)</sup>，荒木勉<sup>3)</sup>

1)日本マイクロ光器（株）

2)徳島大学 大学院ソシオテクノサイエンス研究部

3)大阪大学 大学院基礎工学研究科

# OUTLINE

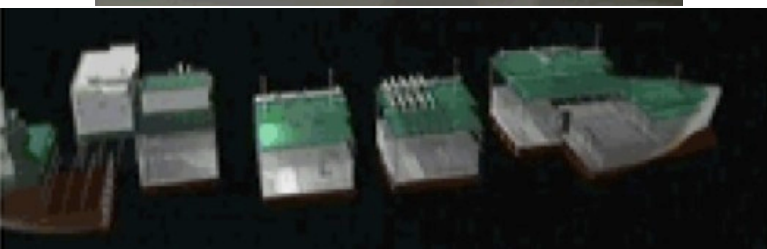
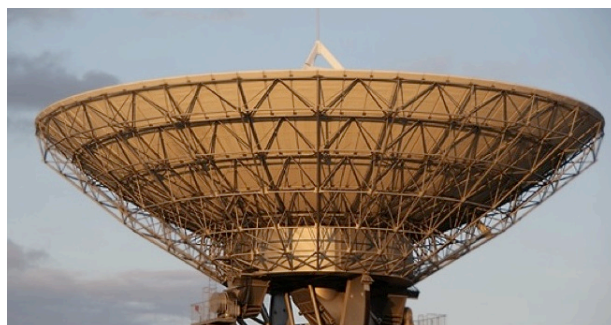
1. 背景
2. 先行研究:光コム距離計
3. 光コムTHzモード間ビートを用いた距離計測
  - 原理
  - 実験システム
  - 実験結果と考察

# 1. 背景

大型構造物・大型装置の製作・評価・管理において  
高ダイナミックレンジな測距技術が求められている

例えば、

1. 航空機・船舶
2. 橋梁
3. 大型パラボナアンテナ
4. 重力波望遠鏡(干渉計)
5. 大型加速器      ...etc.



## 目標

数メートル以上の距離をサブミクロンの精度で測定する『高分解・高ダイナミックレンジ』レーザー計測手法の開発

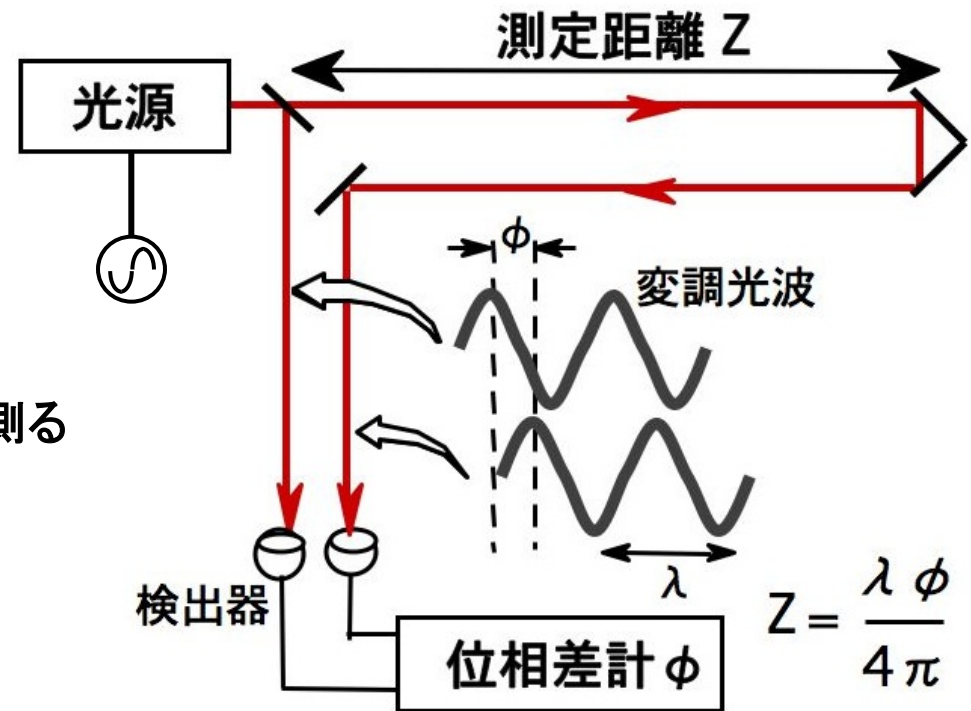
## レーザー光を用いた代表的測距手法

### ➤ レーザー干渉系: 光の波長で測る

- 高分解能
- × 絶対測長範囲が狭い

### ➤ 変調光波距離計: マイクロ波の波長で測る

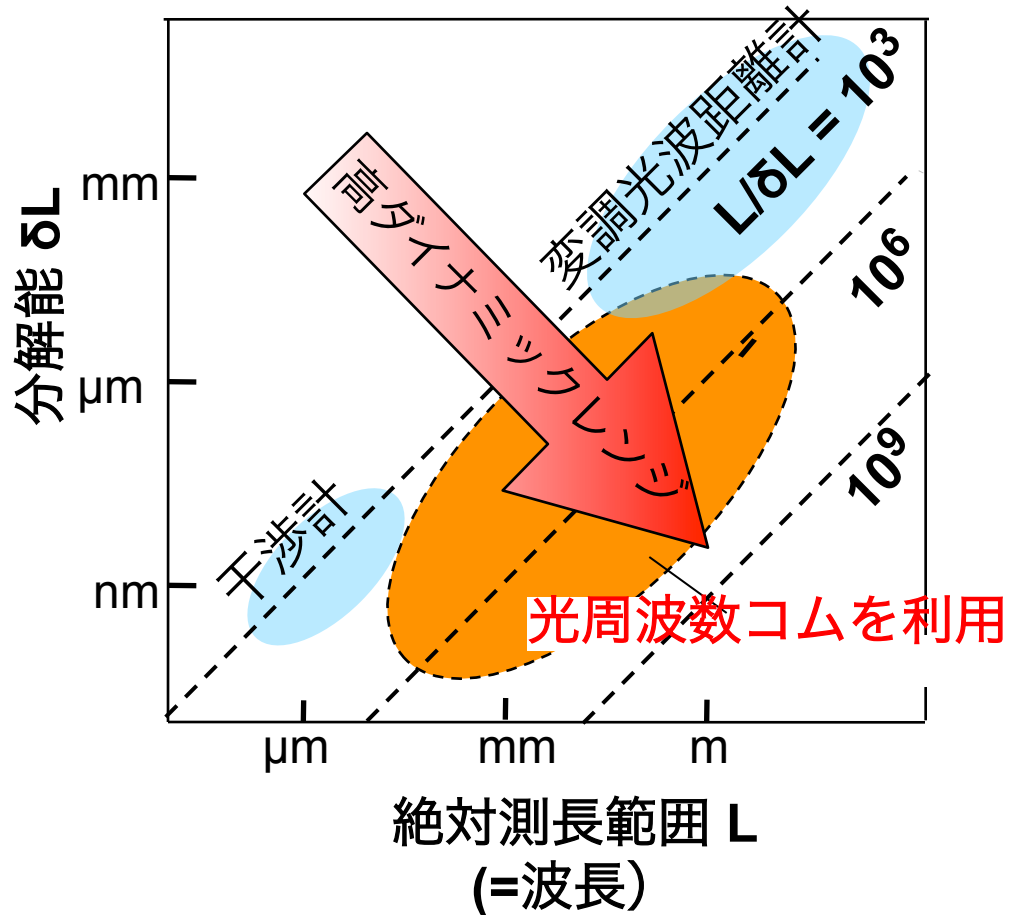
- 絶対測長範囲が広い
- × 分解能が低い



変調光波距離計

# 高分解・高ダイナミックレンジ測距

絶対測長範囲と分解能はトレードオフ



ダイナミックレンジ  $\frac{L}{\delta L}$

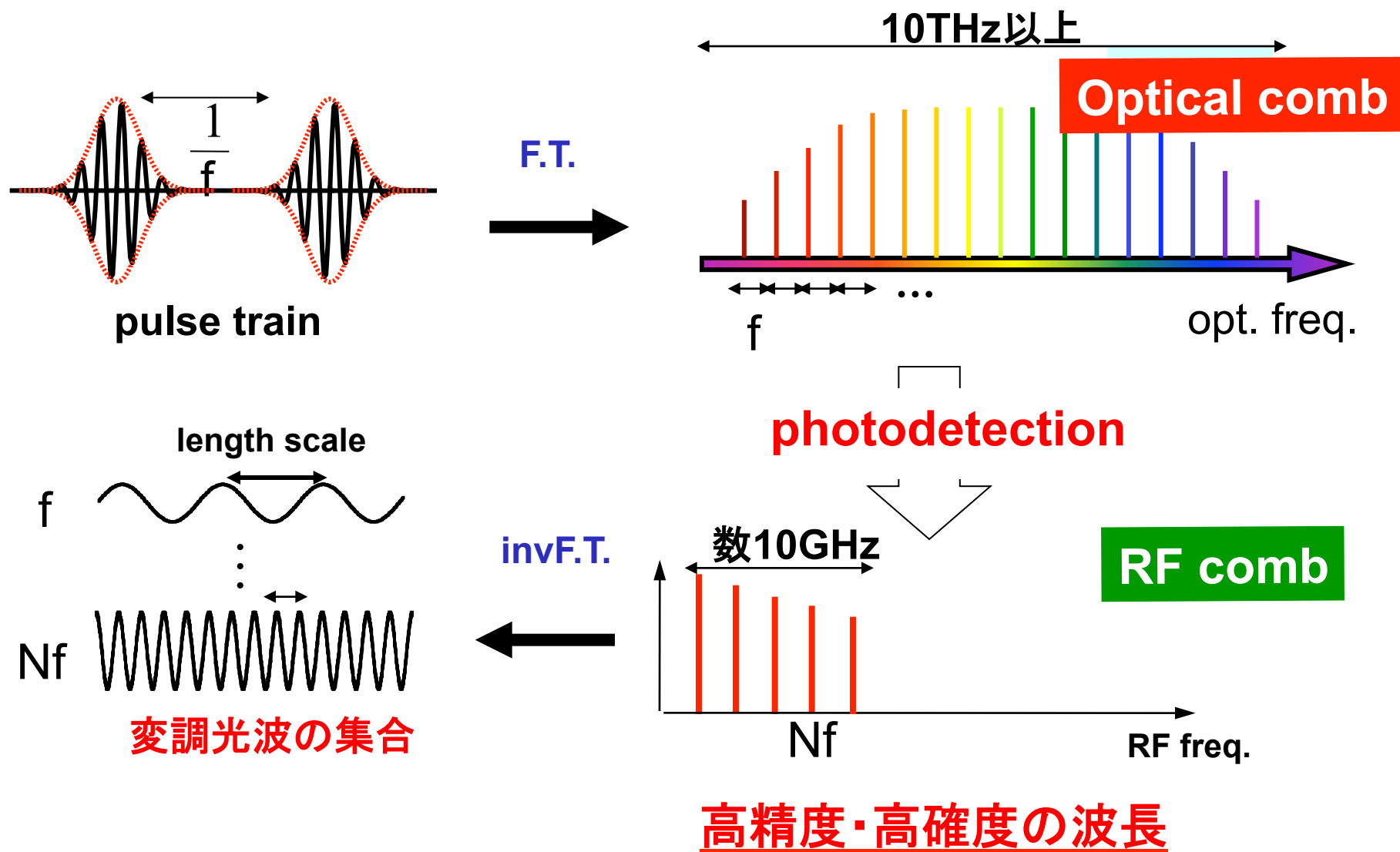
1つの波長を使った場合は位相測定の精度で決まりせいぜい3~4桁

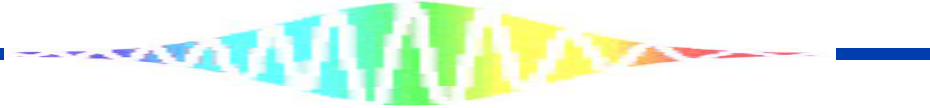


複数の波長を使用

**光周波数コムの利用**

## 2. 先行研究 コム距離計

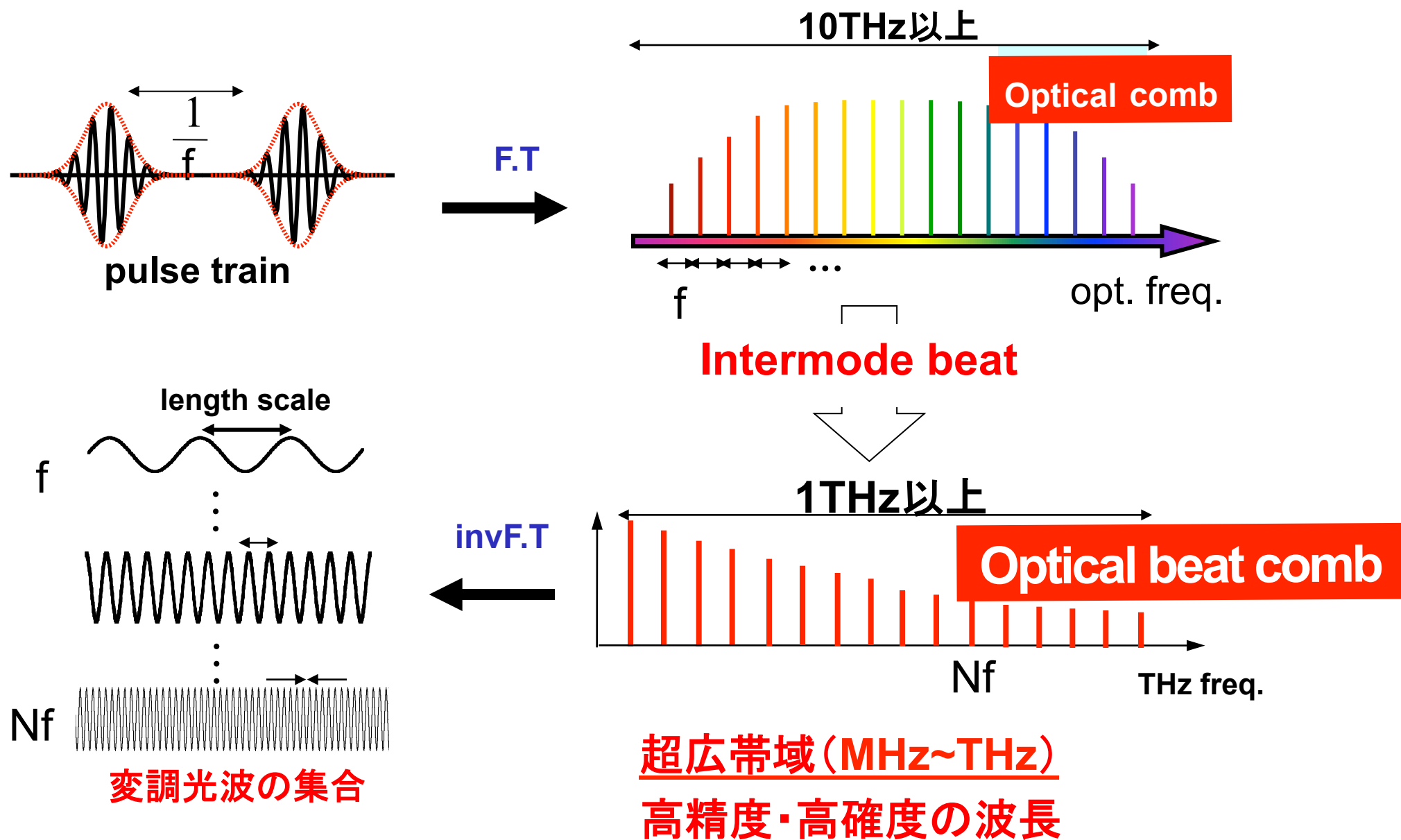




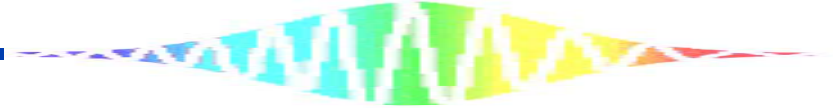
### 3. 光コムTHzモード間ビートを用いた距離計測

高分解・高ダイナミックレンジ測距を目指す

# 光周波数コムより生成される光ビートコム



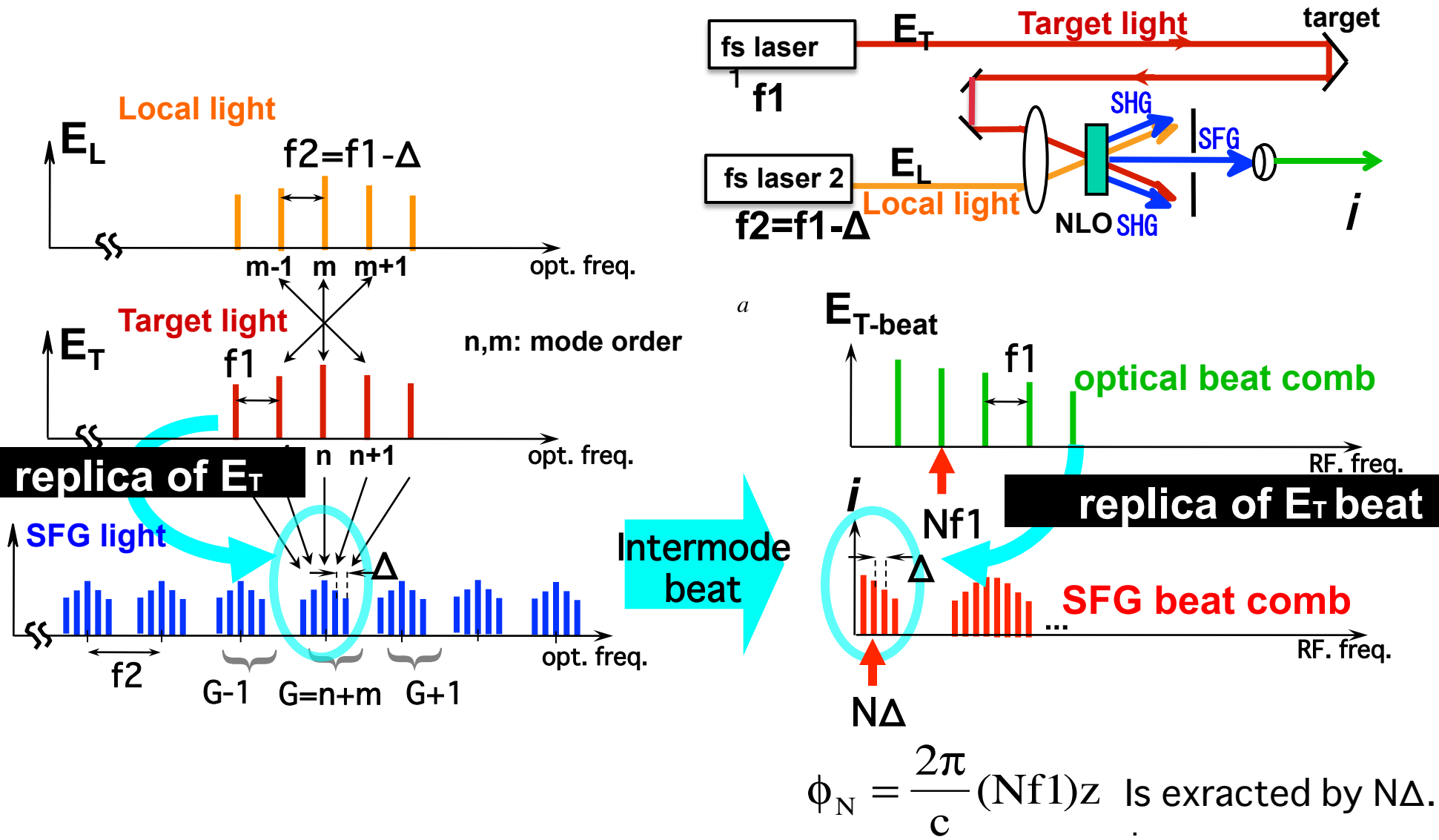




『多周波ヘテロダイン相互相関検出』  
Multi-Frequency-Heterodyning Cross-Correlation detection  
を用いて  
光ビートコムTHz帯モードを利用する。

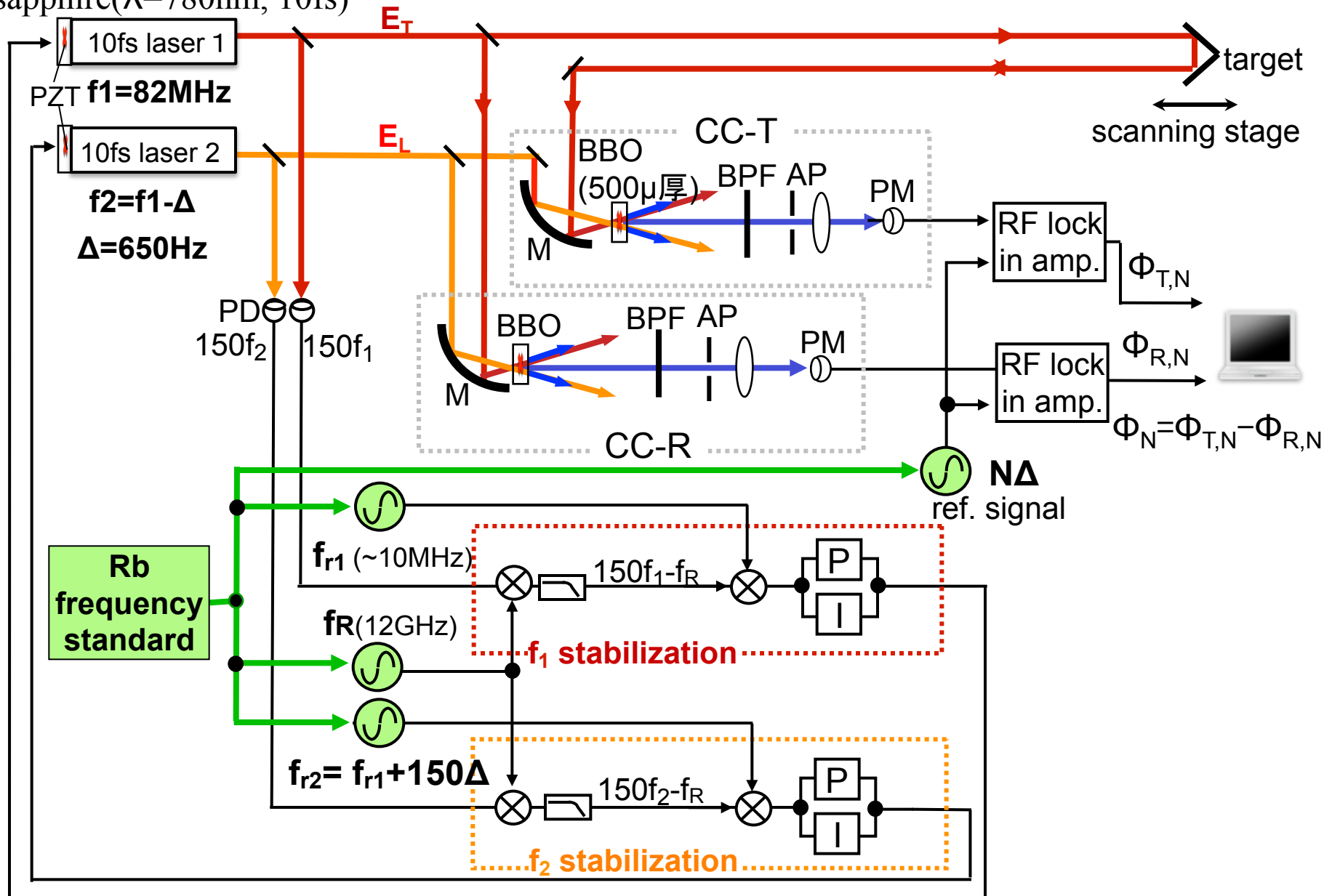
# 多周波ヘテロダイン相互相関検出

## Multi-Frequency-Heterodyning Cross-Correlation detection

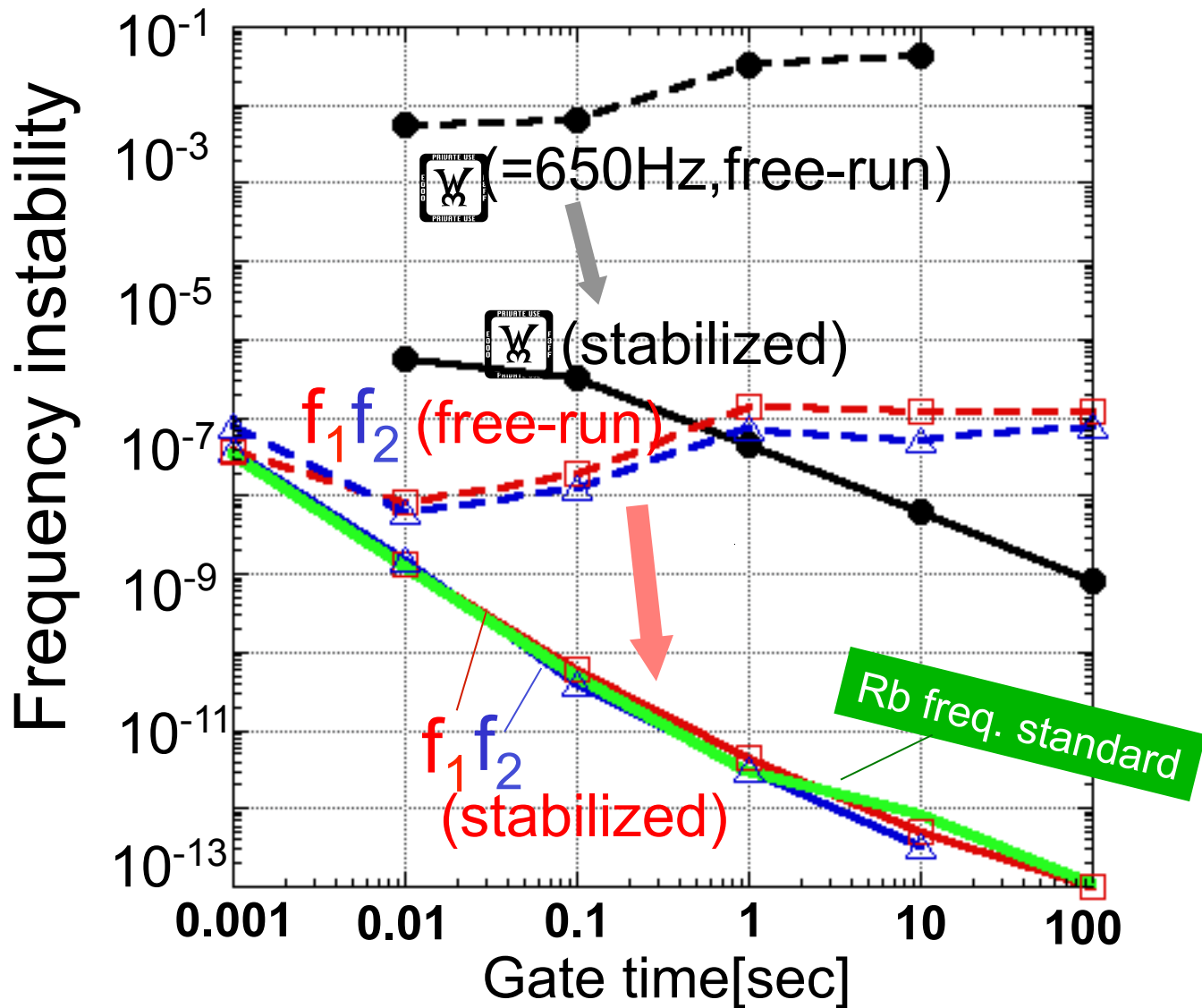


# Measurement System

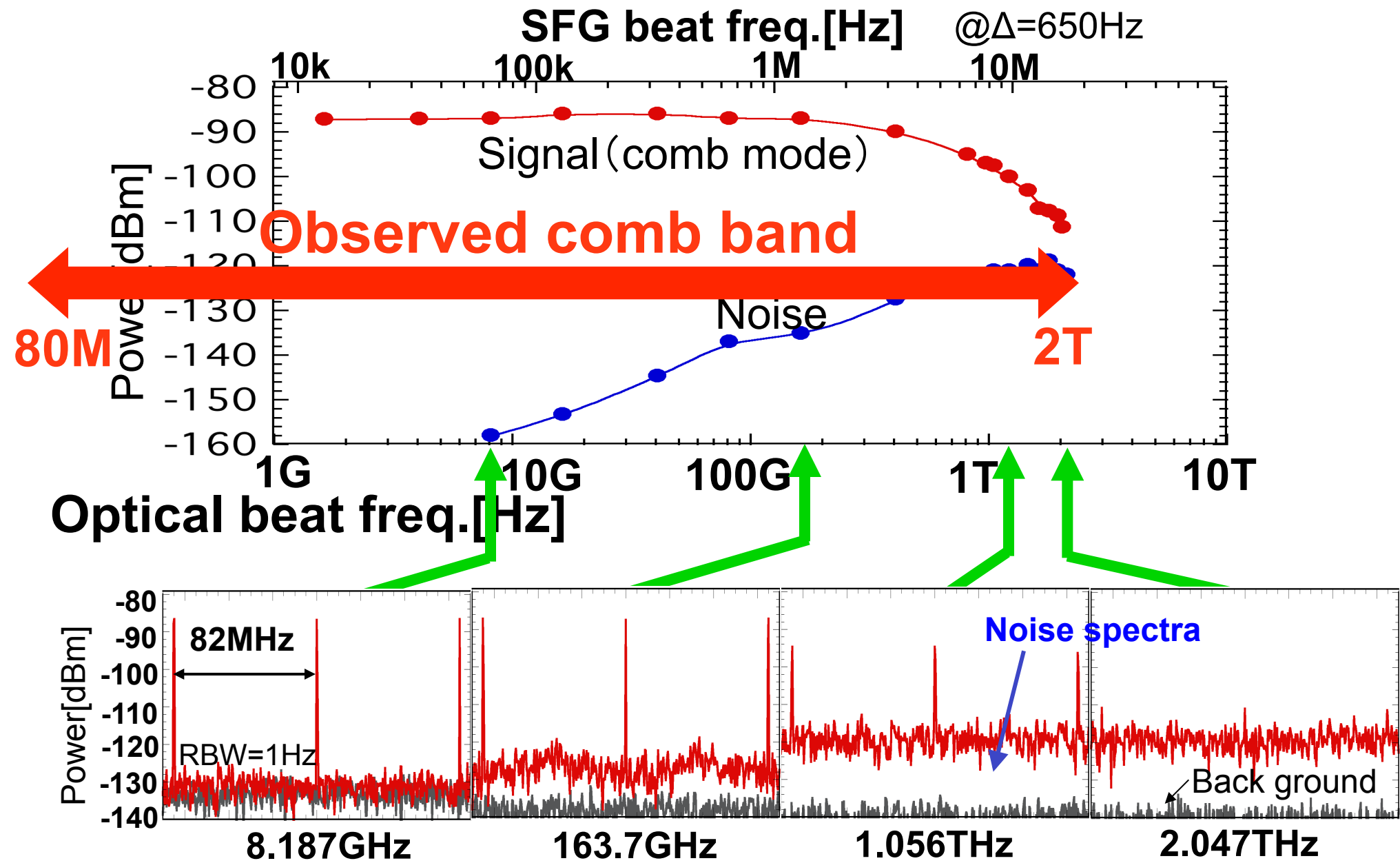
Ti:sapphire( $\lambda=780\text{nm}$ , 10fs)



# Frequency Stability

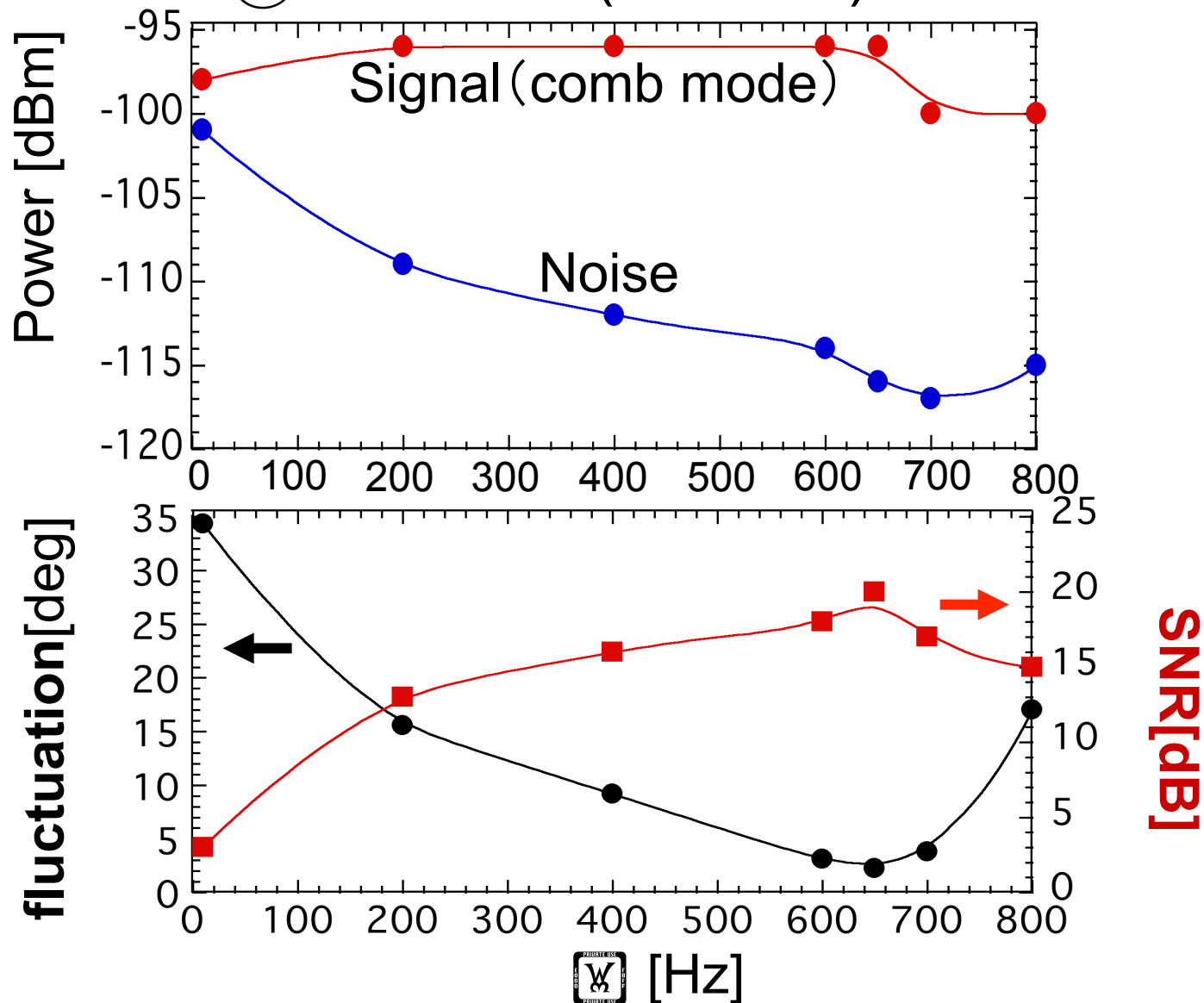


# Optical beat comb observed by SFG beat comb

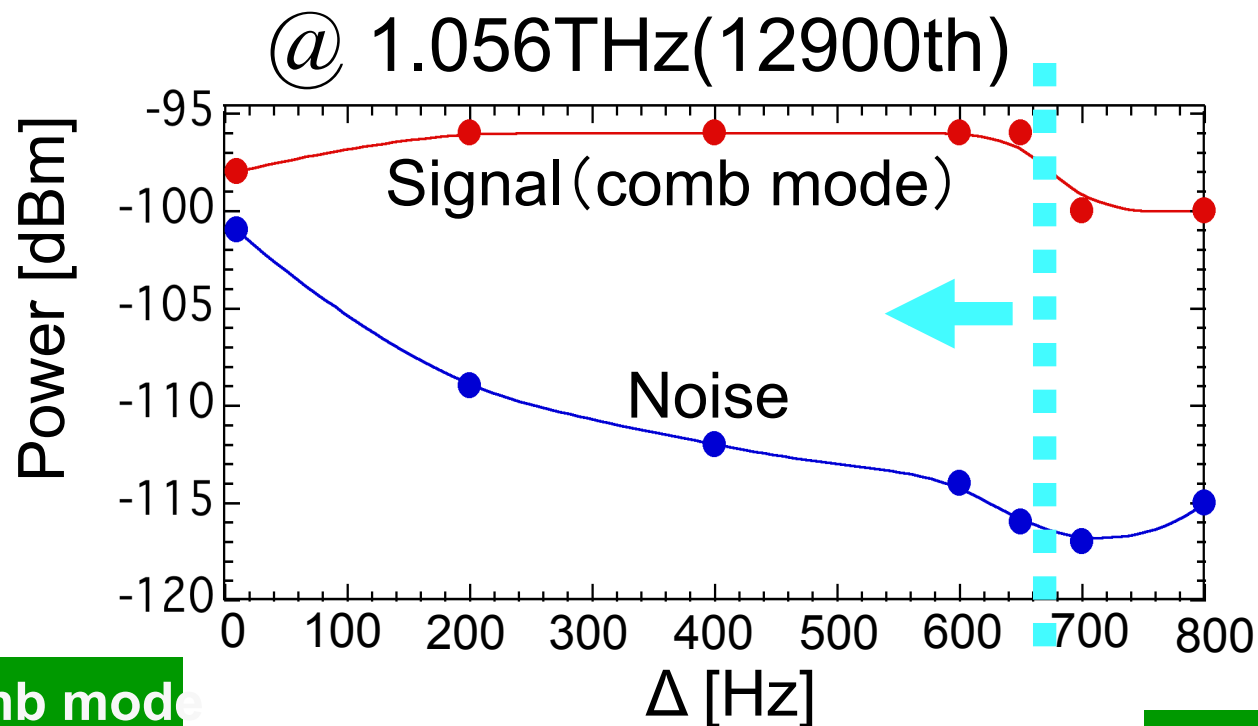


# Phase fluctuation and SFG beat comb spacing $\Delta$

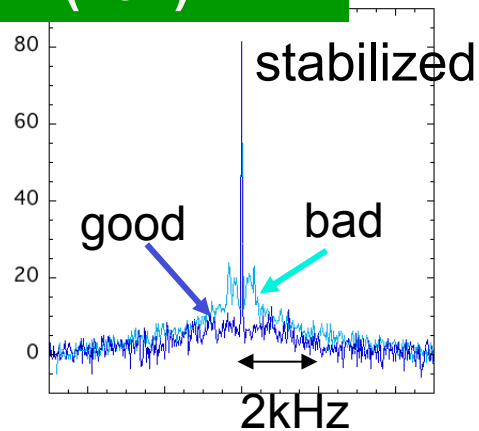
@ 1.056THz(12900th)



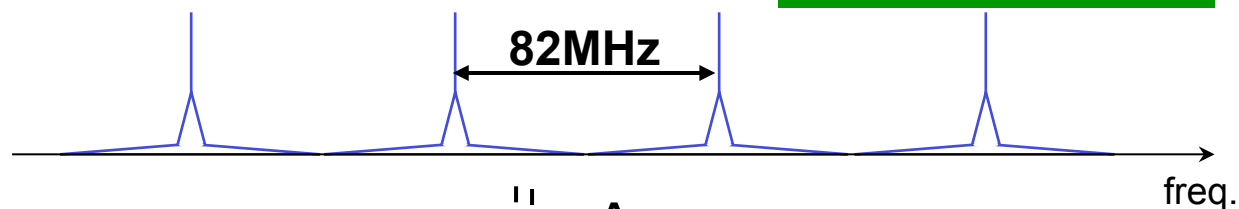
# What is true character of Noise spectra?



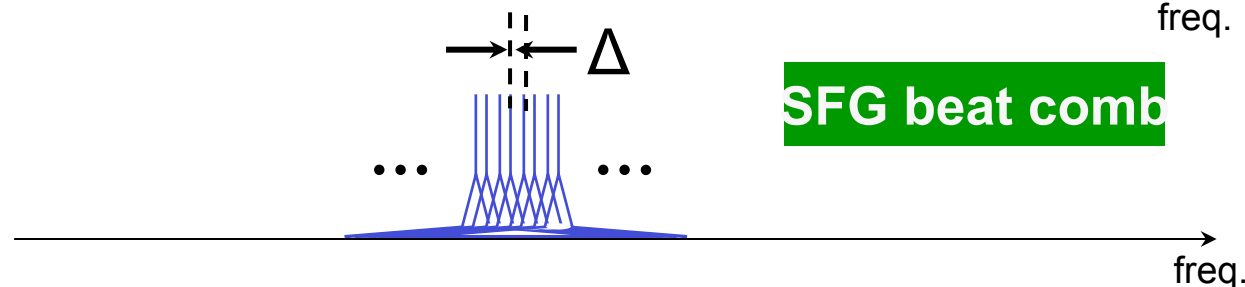
Optical beat comb mode  
2GHz(25<sup>th</sup>)



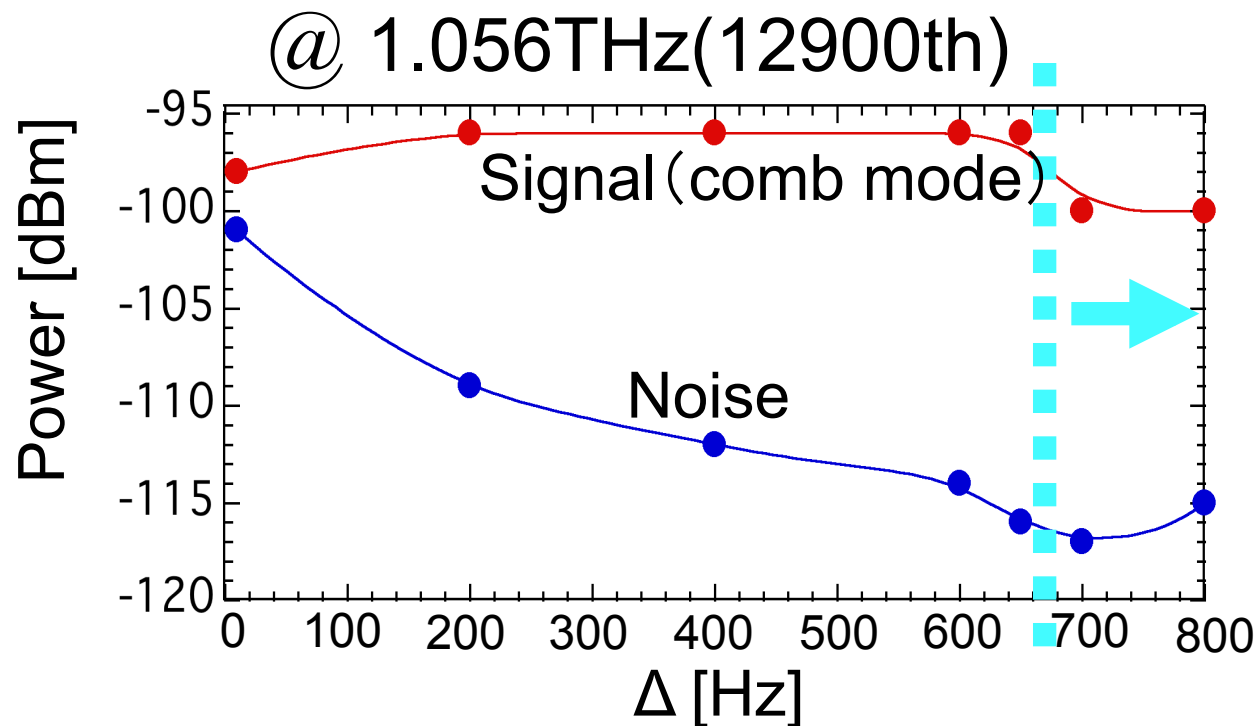
Optical beat comb



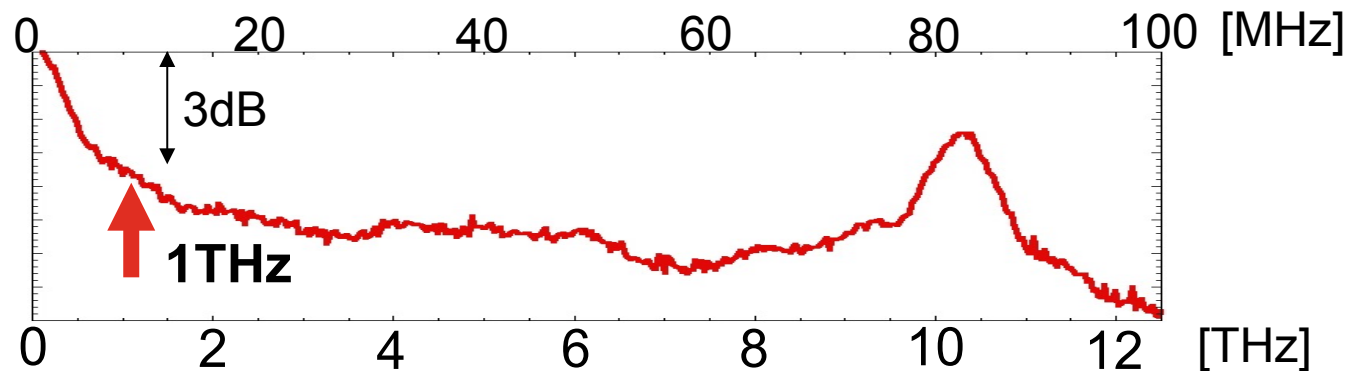
SFG beat comb



# What is true character of Noise spectra?

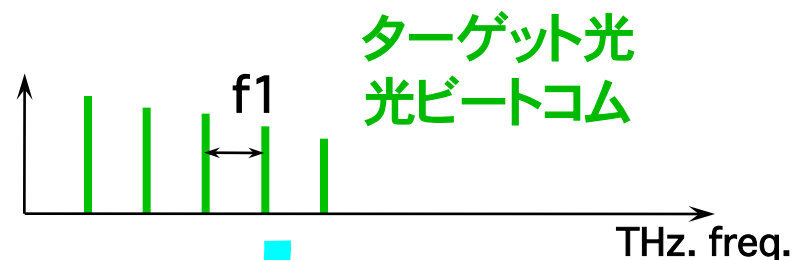
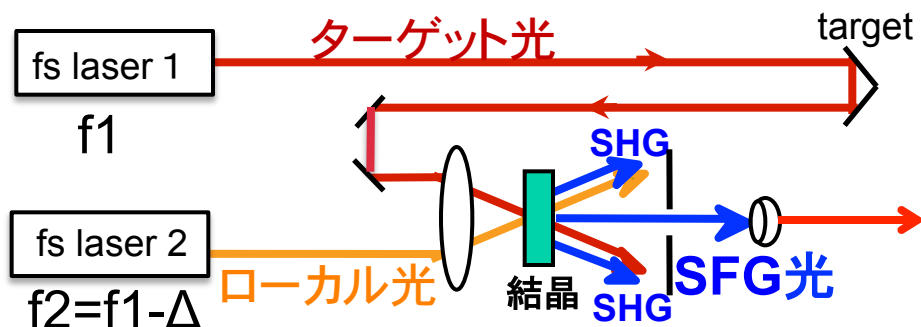
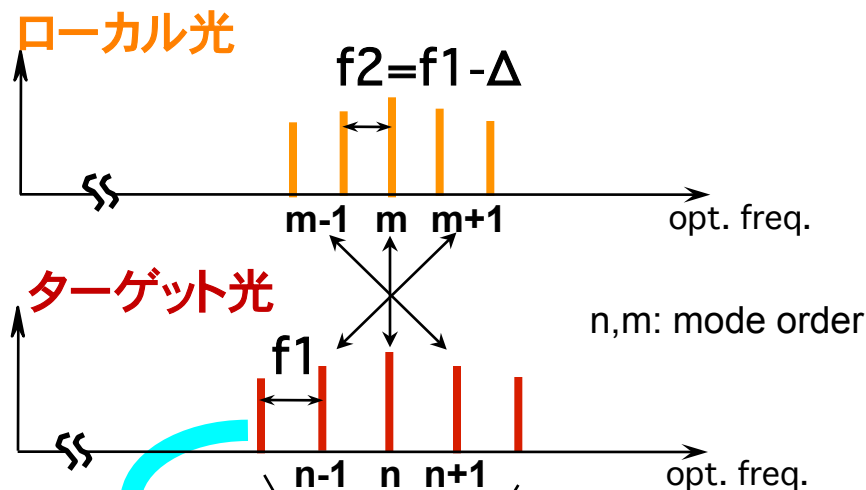


SFG beat comb @  $\Delta=650\text{Hz}$

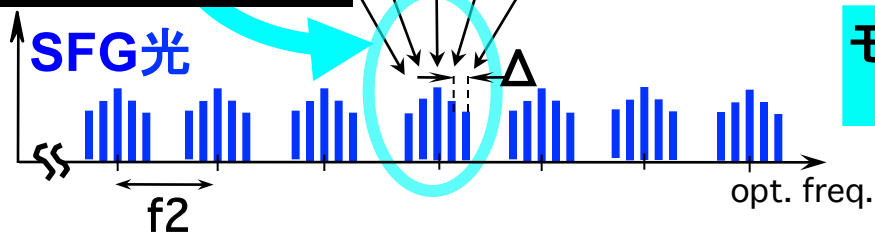




# 多周波ヘテロダイン相互相関検出



光コムのレプリカ



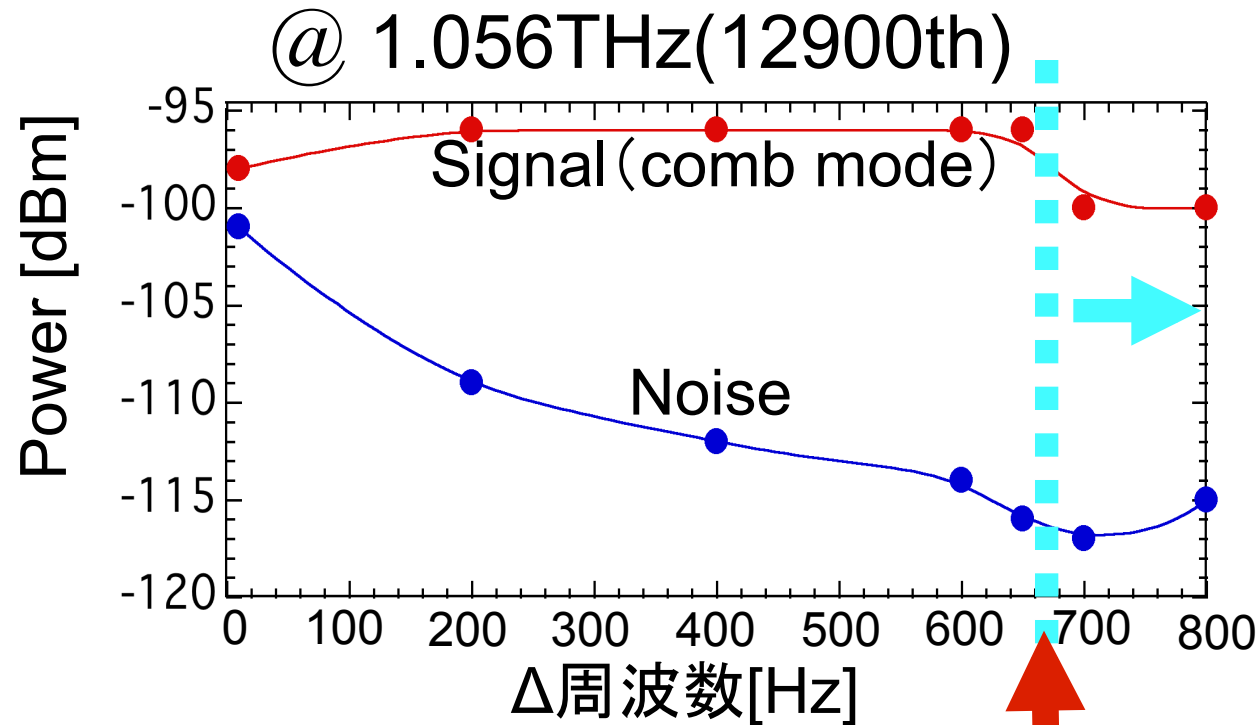
モード間  
ビート

光ビートコムのレプリカ



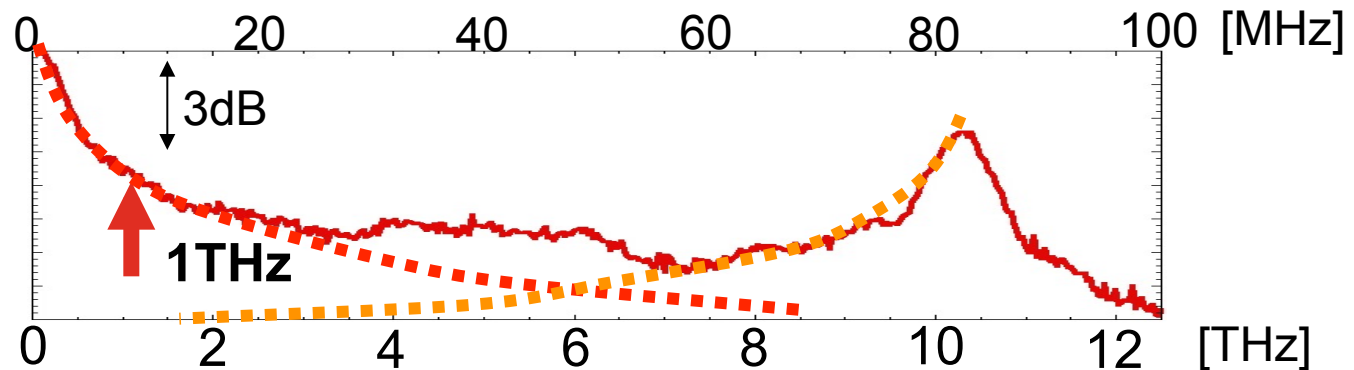
2-nd group

# What is true character of Noise spectra?

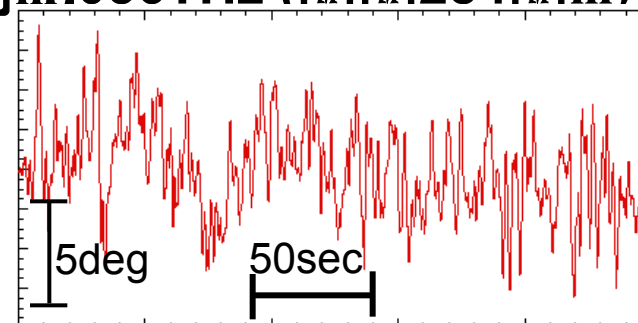
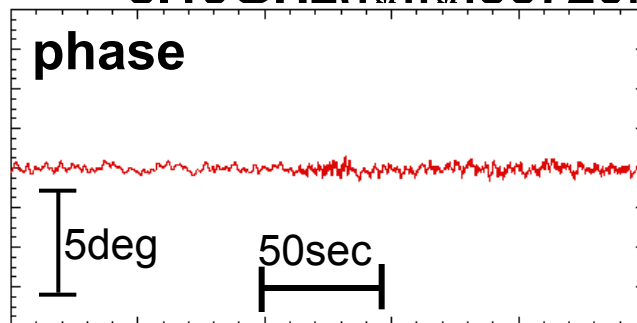
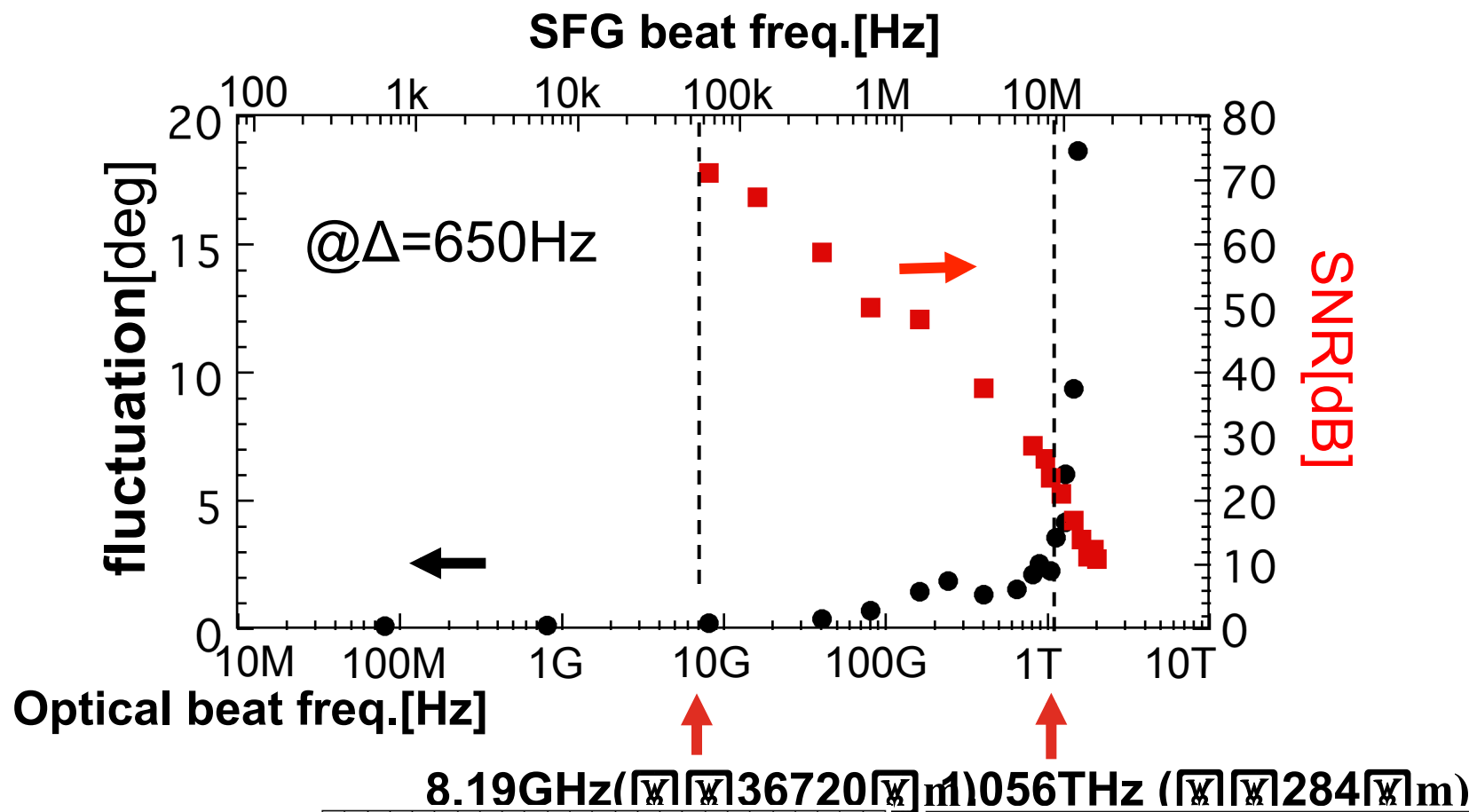


SFG beat comb @  $\Delta=650\text{Hz}$

$\Delta=650\text{Hz}$

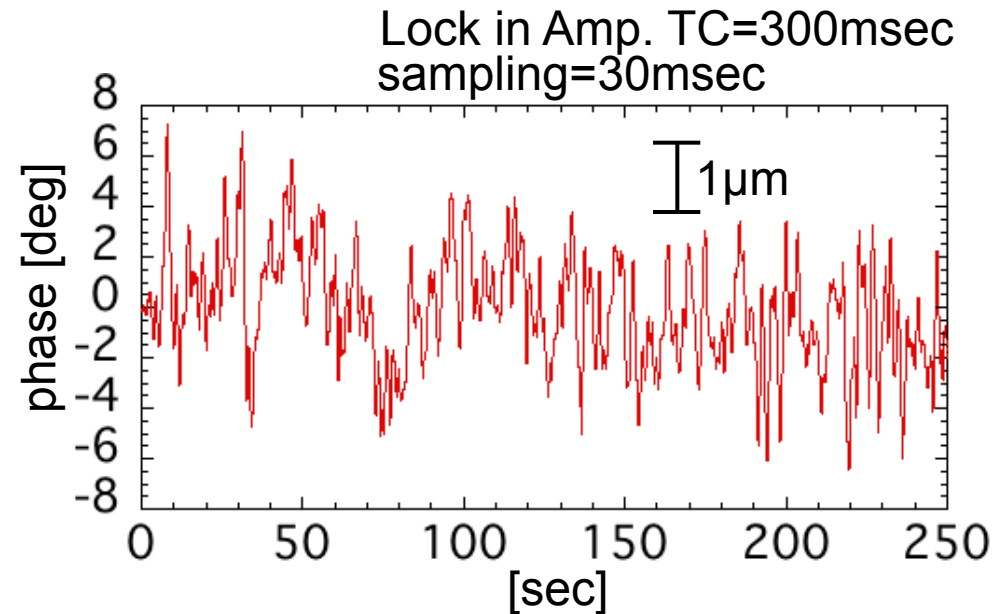
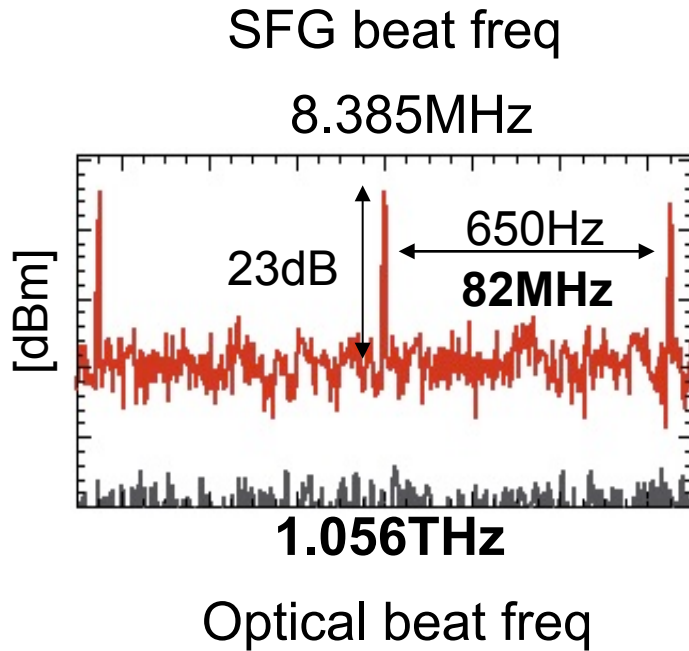


# Phase fluctuation and SNR of Optical beat comb



# Phase measurement of 1.056THz( $\lambda = 284\mu\text{m}$ ) Optical beat

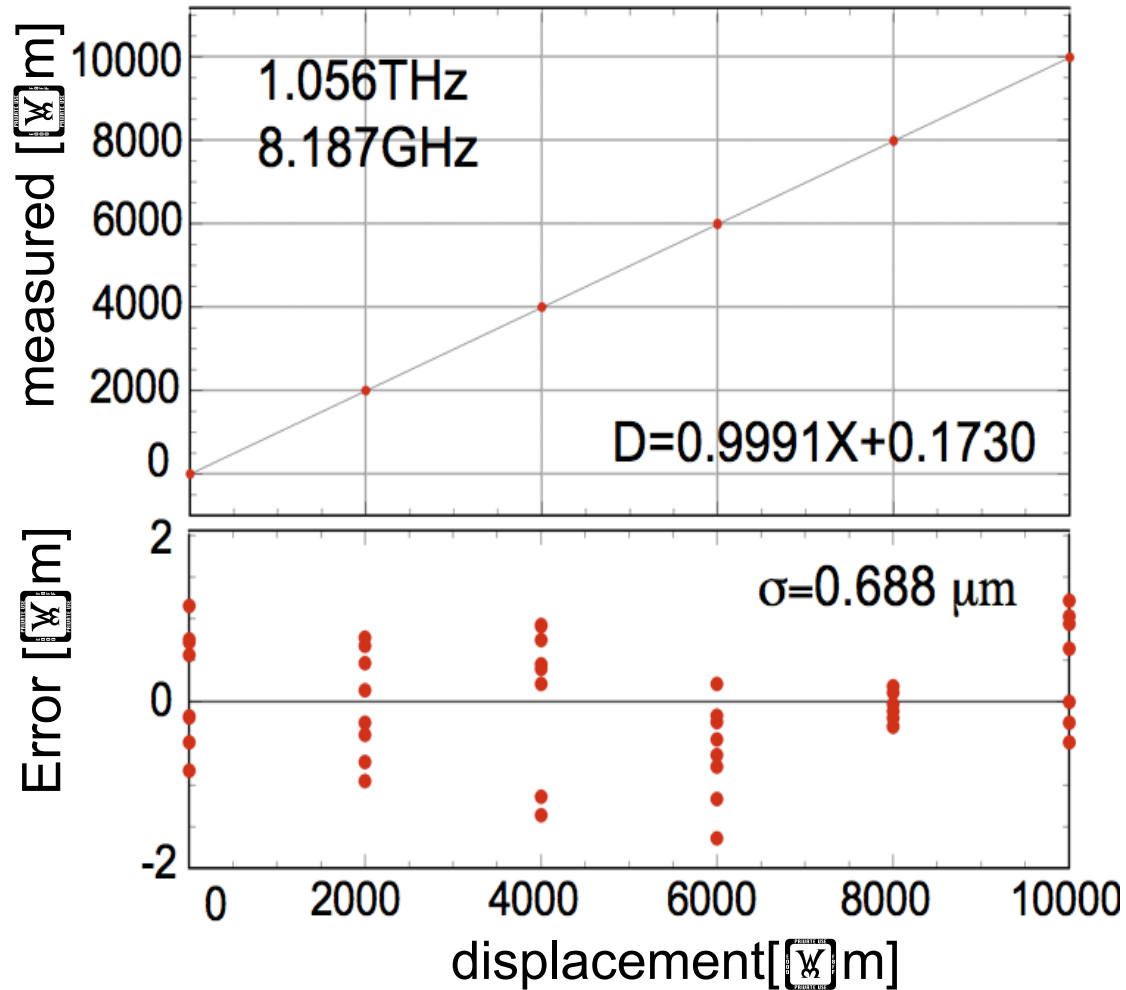
## Target Still



$$\sigma = 2.08 \text{deg}$$

$$(\approx 0.820 \mu\text{m})$$

# High-dynamicrange measurement using 1.056THz( $\mu\text{m}$ ) 284( $\mu\text{m}$ ) - 8.17GHz( $\mu\text{m}$ ) 36720( $\mu\text{m}$ )



experiment

- lock in amp. TC: 300ms
- 15秒間測定/step
- 7回測定

Error:  $\mu\text{m}$  = 0.688  $\mu\text{m}$



2つの光ビートで18mmを  
サブ $\mu\text{m}$ 精度で測定



更に80MHz(1th)光ビートを使えば  
サブ $\mu\text{m}$ 精度で1.8mまでの  
ダイナミックレンジ拡張が可能

# 課題

## 高分解

### 1THz光ビート位相測定精度向上・より高次の光ビートの利用

- $f_1, f_2, \Delta$ の安定性向上
- レーザの最適化  
コム間隔の大きいレーザ  
帯域の狭いレーザ
- 相互相関係数の結晶厚の最適化

## 高ダイナミックレンジ

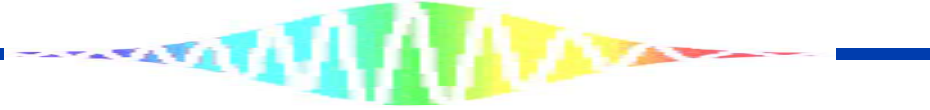
- 複数光ビート次数の最適化
- 長距離測定の実現・評価

# まとめ

光ビートコム<sup>①</sup>のTHz帯光ビートを『多周波ヘテロダイン相互相関検出』により検出し、これを用いたサブ $\mu\text{m}$ 精度測距が実現出来た。

- \* 1.056THz光ビート測定で分解能( $\sigma=0.82\mu\text{m}$ )が得られた。
- \* 1.056THz, 8.17GHz2つの光ビートによる高ダイナミックレンジ測距を行い、測定誤差は( $\sigma=0.688\mu\text{m}$ )であった。

—本研究の遂行に当たっては三豊科学技術振興協会の研究助成を受けた—





# 絶対距離計測

$$D = \frac{c}{2Nf_1n_g} \left( I_N + \frac{\Phi_N}{2\pi} \right)$$

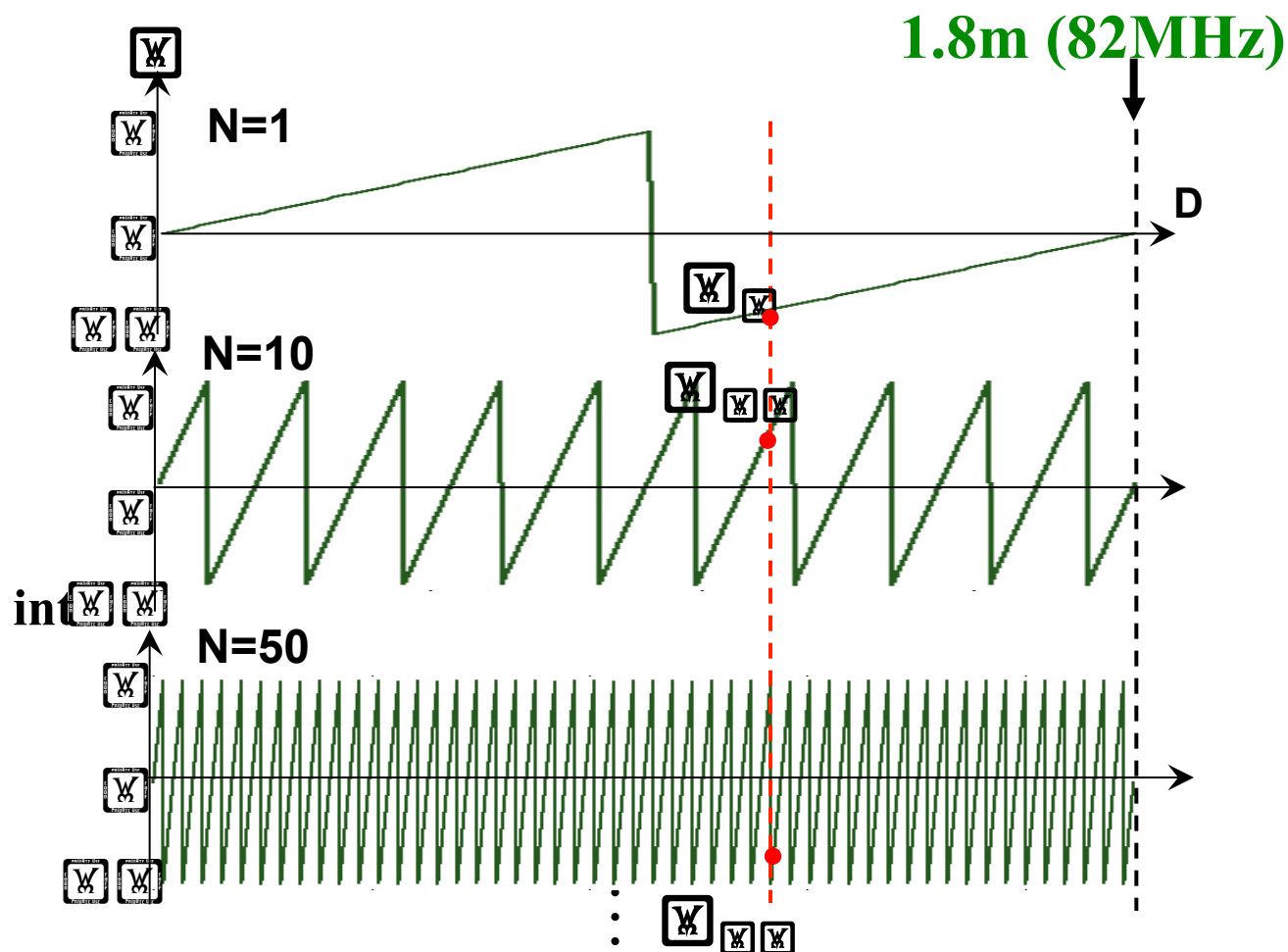
位相:

$$\Phi_N = -\frac{2\pi Nf_1n_g}{c} 2D$$

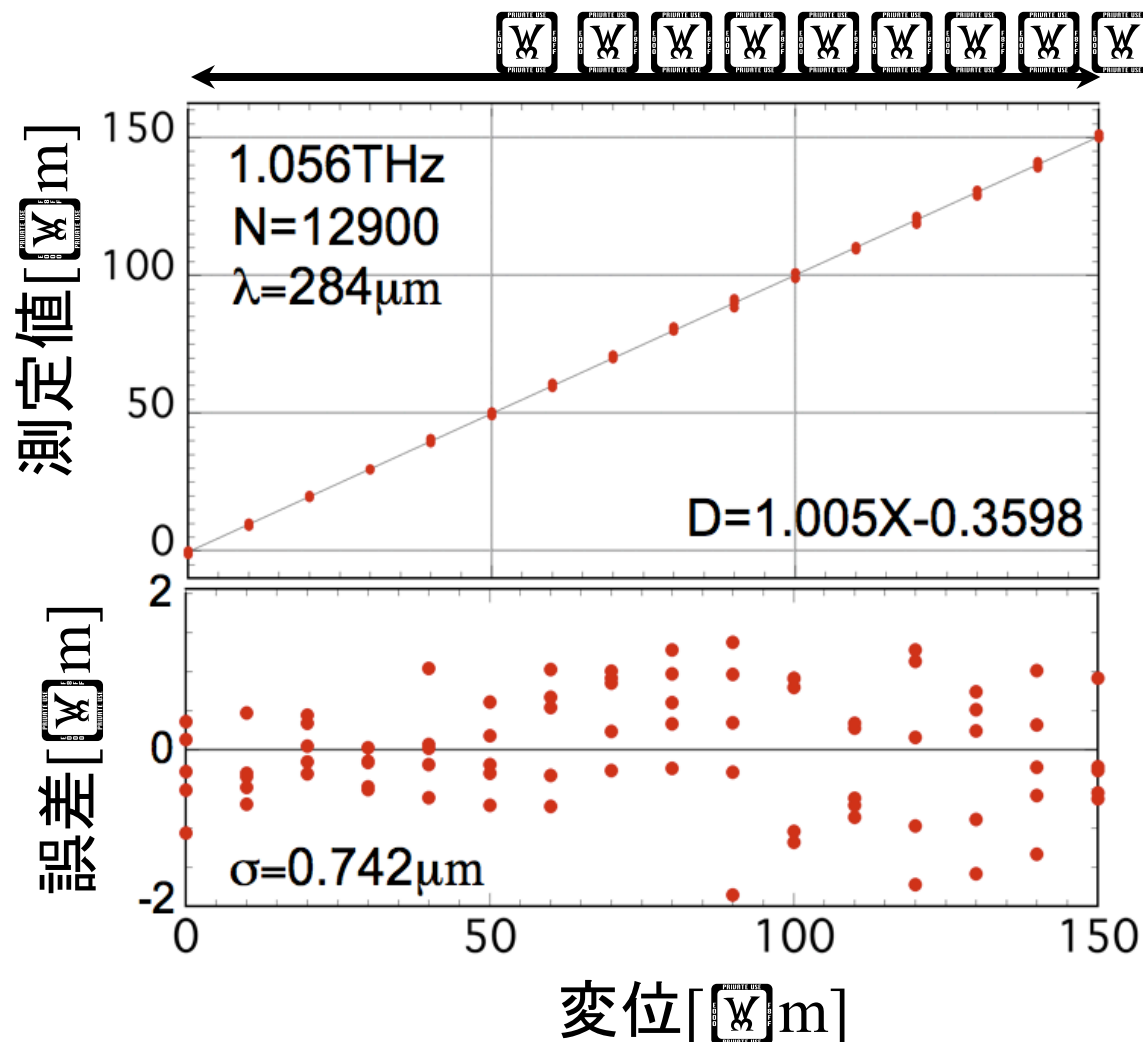
位相繰返し回数:

$$I_N = \left[ \frac{1}{2\pi} \left( \Phi_{NL} \frac{N}{N_L} - \Phi_N \right) \right]$$

$$\left( \delta\Phi_{NL} < \frac{\pi N_L}{N} \right)$$



# 1.056THz (284μm)光ビートによる変位測定



## 実験条件

- ロックインアンプ時定: 300ms
- 15秒間測定/step
- 7回測定

測定誤差:  $\sigma=0.742\mu\text{m}$

742nm



サブμmの測定精度

# 複数光ビートによる高ダイナミックレンジ測定

0.56THz(  $\lambda$   $\lambda$  284  $\mu$ m, 12900th ) - 8.17GHz(  $\lambda$   $\lambda$  36720  $\mu$ m, 100th )

## 1.056THz光ビート整数次数 $I_{12900}$ の決定

$$D = \frac{c}{2Nf_1n_g} \left( I_{12900} + \frac{\Phi_{12900}}{2\pi} \right)$$

$$I_{12900} = \left[ \frac{1}{2\pi} \left( \Phi_{100} \frac{12900}{100} - \Phi_{12900} \right) \right]_{\text{int}}$$

$$\left( \delta\Phi_{NL} < \frac{\pi N_L}{N_H} \right)$$

変位[ $\mu$ m]	$\Phi_{100}$ [deg]	$\Phi_{12900}$	$I_{12900}$
2000	38.904	27.718	14
4000	78.580	60.786	28
6000	118.35	89.965	42
8000	156.81	119.35	56
10000	196.96	148.09	70
2000	38.918	26.381	14
4000	78.728	59.752	28
6000	118.43	87.104	42
8000	156.90	116.88	56
10000	197.03	149.90	70
2000	38.729	29.890	14
4000	78.657	61.077	28
6000	118.29	89.035	42
8000	156.81	120.30	56
10000	196.94	148.26	70