

# THz スペクトラム・アナライザーの開発

## Development of a spectrum analyzer for THz region

○中村 遼太郎, 横山 修子, 安井 武史, 荒木 勉

○Ryotaro Nakamura, Shuko Yokoyama, Takeshi Yasui, and Tsutomu Araki

大阪大学大学院 基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

E-mail: t-yasui@me.es.osaka-u.ac.jp, http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/

We proposed and demonstrated a spectrum analyzer for sub-THz and THz waves based on the concept of THz frequency comb. Effectiveness of the proposed method is demonstrated by measurement of a 100-GHz test source. The achieved accuracy and signal-to-noise ratio of frequency measurement were  $2.85 \times 10^{-11}$  and 46.2 dB, respectively.

### 1. はじめに

周波数は、電磁波の最も基本的な物理量の一つである。これまで未開拓電磁波領域とされた THz 領域に関しては、電気的手法（ヘテロダイン法など）や光学的手法（干渉法など）によるアプローチはあったものの、高い周波数精度を有する計測手法は未だ確立されていない。

モード同期 Ti:S レーザーから出力される高繰り返し超短パルス光は、周波数領域では光周波数コムと呼ばれる超マルチ分散スペクトル構造を示し、そのモード間隔はモード同期周波数と厳密に一致する。この光コム構造は周波数軸における正確なモノサシとして利用可能であるため、可視・近赤外領域における超精密光周波数計測手法として期待されている<sup>1)</sup>。この光コムを THz 検出用光伝導アンテナ(PCA)に入射すると、PCA の超広帯域復調効果によりコムスペクトルが THz 領域までダウンコンバートされ、光励起電流の周波数コムが PCA 内に生成される (PC-THz コム)。PC-THz コムは、広帯域な周波数選択性・高いスペクトル純度・周波数通倍機能といった特徴を有するので、これを超精密レーザー制御により高度に安定化すれば、THz 領域における正確な周波数物差しとしての利用が可能である<sup>2,3)</sup>。今回は、PC-THz コムを基準とすることにより、CW-THz 光源の周波数をリアルタイムで観測可能な THz スペクトラム・アナライザー (THz スペアナ) を報告する<sup>4)</sup>。

### 2. 原理

THz スペアナの原理は、ヘテロダイン法に基づいている (Fig.1)。従来の電気的ヘテロダイン法との違いは、PC-THz コムを複数周波数の局部発振器として用いることによりサブ THz~THz 領域をカバー可能であることと、ヘテロダインレシーバーとして PCA を用いることにより室温での高感度 THz 検出を可能としている点である。PCA でミキシングされた PC-THz コムと CW-THz 波の RF 帯ビート信号は、電流-電圧変換アンプで増幅された後、RF スペクトラム・アナライザーで観測する。

Fig.2 は測定原理を示している。フェムト秒レーザー光 (モード同期周波数= $f$ ) を PCA のギャップに集光すると、光伝導膜 (低温成長 GaAs 薄膜) 中に PC-THz コムが生成される [Fig.2(a)]。このような PC-THz コムが生成された PCA に被測定波である CW-THz 波が入射されると、光伝導ミキシング過程を通して、PC-THz コムと CW-THz 波のビート信号が RF 帯に発生する [Fig.2(b)]。PC-THz コムを構成する各モードの線幅は十分に狭いと考えられるので、このビート信号を RF スペアナで観測することにより CW-THz 波を間接的に計測できる。ここで、最低次のビート信号(周波数= $f_b$ )は CW-THz 波に最隣接した PC-THz コムのコム・モードとビート信号である。このコム・モードの次数を  $m$  とした場合、CW-THz 波の絶対周波数( $=f_x$ )は

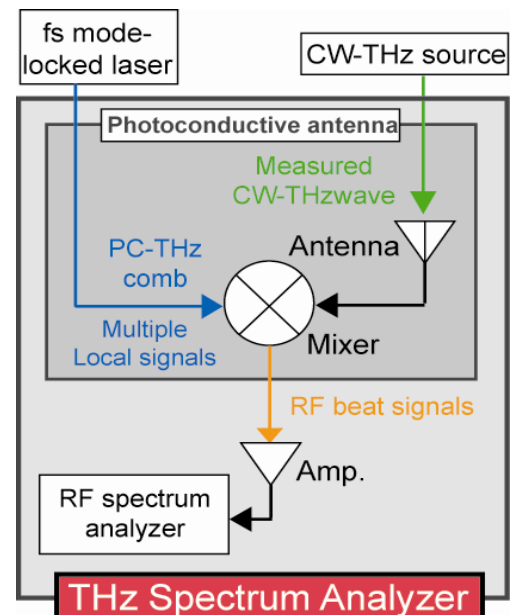


Fig.1 Schematic diagram of THz spectrum analyzer.

$$f_x = mf + f_b \quad (1)$$

で表わされる。  $f$  は周波数カウンタ、  $f_b$  は RF スペアナで測定可能である。 次数  $m$  を求めるためには、モード同期周波数を  $f$  から  $f + \delta f$  に変化させる。この時ビート信号は  $f_b$  から  $f_b + \delta f_b$  に変化する。この時  $m\delta f$  と  $\delta f_b$  が等しくならなければならないため、

$$m = f_b / \delta f \quad (2)$$

と求まる。最終的に、  $m$ 、  $f$ 、  $f_b$  より絶対周波数が求まる。

### 3. 実験

THz スペアナの CW-THz テスト光源として、Rb 原子時計(確度:  $5 \times 10^{-11}$ , 安定度  $2 \times 10^{-11}$ )に同期した周波数シンセサイザで駆動された周波数通倍器(発振周波数: 75-110 GHz, 通倍数: 6, 出力: 2.5 mW)を用いた。また、PC-THz コム生成用超短パルスレーザーのモード同期周波数を同上の Rb 原子時計を基準としたレーザー制御システムで安定化することにより、Rb 原子時計と等価な PC-THz コムを実現している。Fig.3(a)および(b)は、線形表示及び対数表示された最低次ビート信号(周波数  $f_b$ )を示している( $f=81,823,757$  Hz,  $f_x=99,007,200,000$ Hz)。Fig.3(a)より線幅は 1.35 Hz であるが、これは RF スペアナの周波数分解能で制限されている。一方、SN 比は 46.2 dB となり、検出限界感度は約 25 nW と推定できる。

次に絶対周波数測定を行った。上期の状態からモード同期周波数を変化させ次数  $m$  を決定したところ、1210 次となった[Fig.3(c)]。絶対周波数を式(1)から求めたところ 99.007,119,998 GHz となり、設定値との誤差は 2.5 Hz となった。THz スペアナの周波数確度を求めるために、75-110 GHz で 5 GHz 刻みに絶対周波数を測定したところ、Table 1 のようになった。周波数確度を  $\text{Error}/f_x$  で定義すると、75-110 GHz の平均確度は  $2.85 \times 10^{-11}$  となった。

### 4. おわりに

THz スペアナを提案し、サブ THz テストソースを用いて検証を行った。周波数確度及び SN 比はそれぞれ  $2.85 \times 10^{-11}$ , 46.2 dB となった。本研究は科研費 18686008 の援助を受けた。

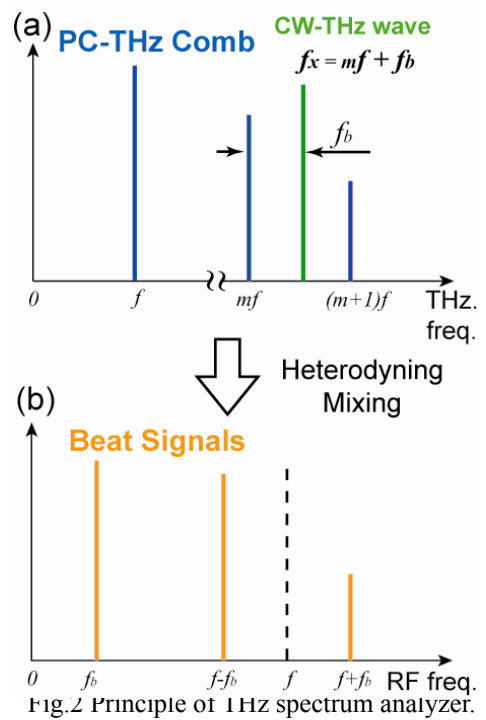


Fig.2 Principle of 1 Hz spectrum analyzer.

Tab.1 Absolute frequency measurement every 5 GHz.

Setting frequency [GHz]	Measured frequency [GHz]	Error [Hz]	Precision
75.033,334,800	75.033,334,796,637	3.363	$4.482 \times 10^{-11}$
80.024,623,200	80.024,623,199,487	0.513	$6.411 \times 10^{-12}$
85.015,851,600	85.015,851,595,634	4.366	$5.136 \times 10^{-11}$
90.007,140,000	90.007,139,997,658	2.342	$2.602 \times 10^{-11}$
94.998,446,400	94.998,446,397,685	2.315	$2.437 \times 10^{-11}$
99.989,728,800	99.989,728,797,413	2.587	$2.587 \times 10^{-11}$
104.981,061,354	104.981,061,351,511	2.489	$2.371 \times 10^{-11}$
109.972,299,617	109.972,299,614,217	2.783	$2.531 \times 10^{-11}$
Average		2.595	$2.848 \times 10^{-11}$

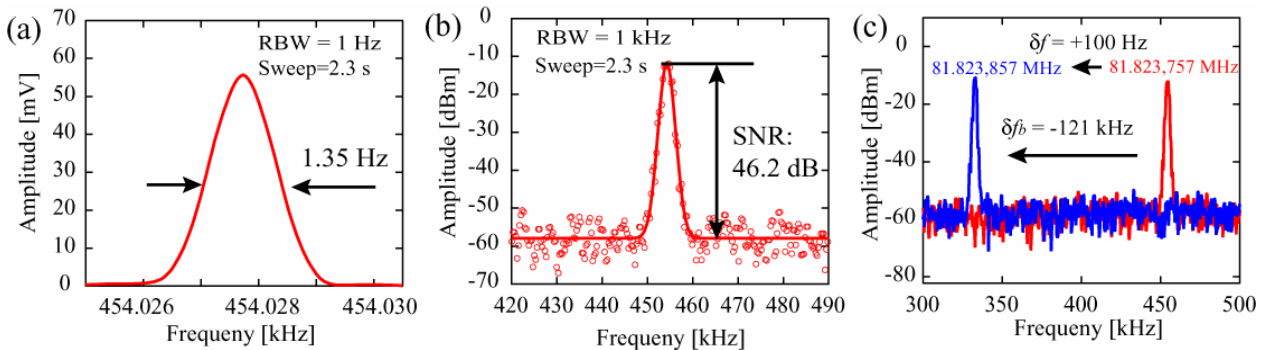


Fig.3 Experimental results of THz spectrum analyzer. (a) The line width of a beat signal. (b) SN ratio of a beat signal. (c) Determination of order  $m$  in absolute frequency measurement process

### 文献

- 1) T. Udem *et al.*, "Optical frequency metrology," *Nature* **416**, pp. 233-237 (2002)
- 2) T. Yasui *et al.*, "Terahertz frequency comb by multifrequency-heterodyning photoconductive detection for high-accuracy, high-resolution terahertz spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.* **88**, 241104 (2006).
- 3) 安井武史, "テラヘルツ周波数コムの発生及び検出", *レーザー研究* **35**, pp. 627-632 (2007).
- 4) S. Yokoyama *et al.*, "Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb," *Opt. Express* **16**, pp. 13052-13061 (2008).