

令和 4 年 6 月 5 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04418

研究課題名（和文）リアルタイムドリフト補償によるテラヘルツ絶対電力の超高感度測定法の開発

研究課題名（英文）Development of ultra-sensitive measurement method for terahertz absolute power by real-time drift compensation

研究代表者

飯田 仁志（Iida, Hitoshi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：40392584

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、テラヘルツ波技術の応用において課題となっていた、高感度絶対パワー測定のドリフト抑制技術を開発した。ドリフト要因を特定するための周波数成分分析技術と、安定な微弱パワーを制御するために不可欠な精密減衰量校正技術を開発したことによって、リアルタイムドリフト補償の基本技術を実証し、測定時間の高速化と微弱テラヘルツ波パワー測定の不確かさ評価に関する重要技術の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波を安心安全に利用するためには、出力されるパワーを高精度に測定する技術の開発が期待されていた。特に、微弱パワーの精密測定には課題が多く、技術革新が進んでこなかった。そのブレークスルーとして、センサのドリフト抑制技術を開発し、微弱パワー測定の不確かさ改善を実現したことによって、テラヘルツ波応用製品の信頼性や性能向上に貢献することができるため、今後の産業応用を加速することができる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have realized a drift reduction technology for high-sensitivity absolute power measurement that accelerates the application development of terahertz waves. In order to identify the cause of drift, we have developed a technique to analyze the frequency component in the terahertz region. Furthermore, we have developed a precision calibration technique for terahertz attenuation, which is indispensable for stable control of small power, and demonstrated the basic technique for real-time drift compensation. As a result, we have succeeded in developing an important technique for speeding up terahertz power measurement and evaluating its uncertainty.

研究分野：計測工学

キーワード：テラヘルツ計測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電波と光の中間の性質を有するテラヘルツ波は、新規物性材料の創生やセキュリティ応用、超高速無線通信等様々な分野で利活用が期待されている。しかしながら、その発生・検出デバイスは発展途上であり、極微弱なパワーを正確に評価する必要があるにもかかわらず、新領域の電磁波であるが故に計測技術が確立していない。正しい測定ができないことがテラヘルツ波応用の技術革新や、安心・安全な利用の阻害要因となっており、実用化への大きな課題であった。研究代表者らは、これまでにカロリメータ方式のテラヘルツ波パワーセンサを開発し、常温での定量測定を実現した。当該センサは、極微弱なテラヘルツ波パワーを測定できるが、精度よく測定するためにはドリフトの抑制が課題であった。本研究では、大きな不確かさ要因となっているドリフトの原因を探るとともに、そのリアルタイム補償に関する要素技術を確立することを目的としている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、テラヘルツ波絶対パワーセンサの高感度化・低雑音化を行い、常温における極微弱なテラヘルツ波パワーの精密定量測定技術を確立することである。研究期間内には、以下の課題に取り組み、ナノワットレベルの極微弱電力測定技術及びその不確かさ評価技術を開発し、テラヘルツ波計測の発展に資する。

- (1) カロリメータによるパワー測定のドリフト要因のうち、主要な成分を補償するための技術を開発する。当該カロリメータは、環境温度変動の影響を低減するために、センサ用と温度補償用の2つのセンサを用いた双子型を採用しているが、この手法で補償しきれない要因を正確に把握し、電氣的に補償する方法の実現を目指す。
- (2) ドリフトに関する不確かさ評価法を確立するためには、微弱なテラヘルツ波パワーを正しく制御する技術、すなわち、テラヘルツ波減衰量の定量測定技術が肝要となる。そこで、本センサで測定対象としているテラヘルツ波空間ビームの減衰量を定量的に測定する手法を開発する。
- (3) 測定時間を高速化するため、センサの応答時間を律速している要因を把握し、センサの低雑音化と併せて最適化を図る。

3. 研究の方法

(1) ドリフト要因の把握と補償技術の開発

ドリフトの要因としては、大きく分類すると、1. 目的外の不要信号の混入、2. 周囲温度の変動が考えられる。前者の寄与を把握するためには、センサに入射する信号の相対強度を、周波数成分毎に正しく評価する必要がある。その要素技術として、フーリエ変換分光法をテラヘルツ領域に適用することを想定し、常温におけるテラヘルツ帯スペクトルの評価を実証する。後者については、本カロリメータで採用している双子型補償素子の感度ばらつきに起因するドリフト要因を把握し、その影響をキャンセルするための回路構成を検討する。具体的には、センサ出力に対して補償素子による補正信号を、感度ばらつきを考慮しながら適切に演算処理することで、リアルタイム補償を行う。

(2) 極微弱パワー計測のためのテラヘルツ波空間ビーム減衰量評価技術の開発

極微弱なテラヘルツ波を正確に測定するには、信号がどれだけ減衰したのかを定量的に把握することが重要である。そのためには、減衰器の減衰量を正しく校正する技術が不可欠である。高周波減衰量の校正では、ヘテロダイン等の周波数変換技術を利用して、精密に減衰量を定めうる標準減衰器と比較測定を行う手法が最も正確と考えられる。しかしながら、テラヘルツ領域でヘテロダインによる周波数変換を行うことは容易ではない。そこで、まずは光音響変換法による周波数変換の可能性を検証する。周波数変換の線形性にも注意しながら、適切な参照標準器を模索し、常温でテラヘルツ波空間ビームの減衰量測定及びその不確かさ解析を行う。

(3) 測定時間高速化のための等温制御系の改善

本カロリメータでは、入射されたテラヘルツ波のパワーを、ヒータによる熱を介して直流の電力に置換して測定する。その際に、センサ部が常に周囲温度と等温になるように帰還制御を行うことで、応答時間の改善を図っている。測定時間をさらに高速化するためには、この制御パラメータを最適化することが必要である。特に、機器の立ち上げ後に測定系が安定するまでにかかり時間を要するので、その原因を追究して改善を図る。

4. 研究成果

(1) ドリフト要因解析のための周波数成分解析技術の開発

外部からの不要信号の混入によるドリフトの影響を検証するにあたり、センサに入力される信号の周波数成分と相対振幅を正しく評価することが不可欠であるため、その測定・解析技術の開発に注力した。赤外領域では、フーリエ変換分光法が広く用いられているが、本研究ではこれを

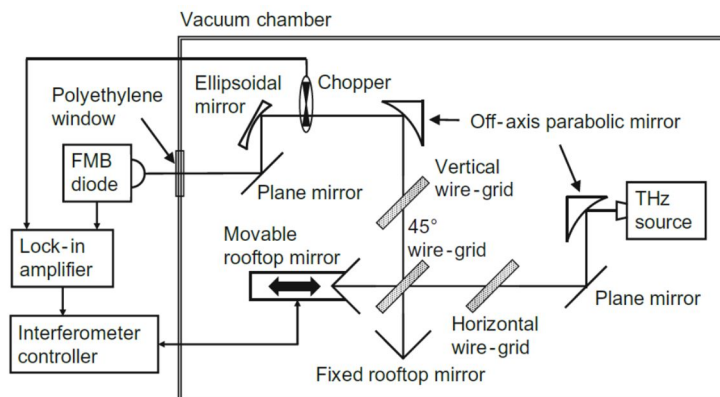


図1 テラヘルツスペクトル分光装置の概要

(Iida et al., J. Infrared Milli Terahz Waves (2019) 40, 952-961)

テラヘルツ領域に拡張するとともに、常温で高感度に測定するための要素技術開発を行った。分光装置の構成としては、ワイヤグリッドを用いたマーチンパレット型を採用した。(図1) 常温でテラヘルツ波の高感度分光を実現するには、検出器の選定が重要である。本研究では、フェルミレベル制御バリアダイオードを検出器として用いるとともに、高圧水銀灯を用いて当該分光装置の感度補正を行う手法を開発した。図2は高圧水銀灯による黒体放射を仮定し、当該分光装置の感度補正係数を評価した結果であり、エラーバーはその標準不確かさを表す。図3はこの補正計数を適用し、基本周波数が0.11 THzのガン発振器の出力を測定した結果であり、第2高調波及び第3高調波が観測されている。これによって、テラヘルツ帯スペクトルの周波数成分と振幅成分を同時に定量的に評価する方法を確立した。

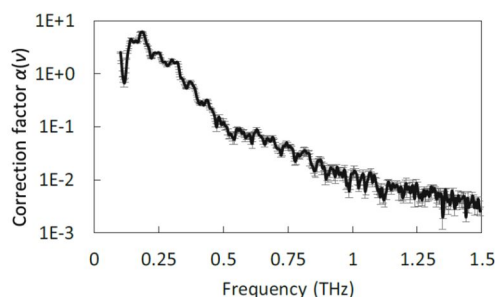


図2 感度補正係数の評価結果

(Iida et al., J. Infrared Milli Terahz Waves (2019) 40, 952-961)

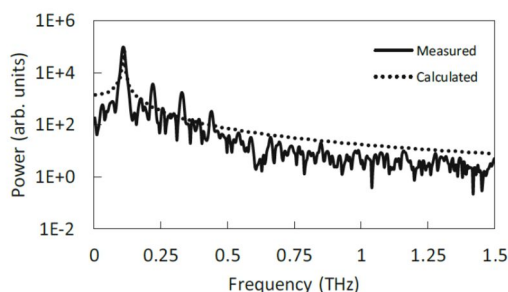


図3 ガン発振器のスペクトル測定結果

(Iida et al., J. Infrared Milli Terahz Waves (2019) 40, 952-961)

(2) テラヘルツ波減衰量精密評価技術の開発

ドリフトの影響を評価するためには、微弱なテラヘルツ波パワーを制御する必要がある。パワーを制御するためには減衰器が用いられるが、その減衰量を正確に定めなければならない。そこで、空間ビームのテラヘルツ波減衰量を正確に測定する技術を開発した。高周波減衰量の測定では、ヘテロダイン等の手法を用いて周波数変換を行い、低周波の参照標準と比較測定をすることで減衰量を正確に定めることができるが、微弱なテラヘルツ波にこの手法を適用することは容易ではない。そこで、光音響変換器を用いた新たな高精度減衰量校正法を提案した。図4は提案した光音響置換法による減衰量校正システムの概要、図5はその外観である。本システムでは、テラヘルツ波の吸収によって発生した熱による体積膨張から音響波を発生する光音響効果を利用して、空間ビームテラヘルツ波の減衰量を測定する。テラヘルツ波と1 kHzの参照信号を交互にスイッチングしたバースト信号を光音響検出器で比較し、ヌル検出することでテラヘルツ波の減衰量を1 kHzの減衰量に置換して精密に測定することができる。表1は本システムによるテラヘルツ波減衰量の校正の不確かさバジェットを示す。0.11 THzの空間ビームテラヘルツ波に対して、金属薄膜減衰器の減衰量を20 dBの範囲において0.46 dB以下の不確かさで構成できることを明らかにした。

(3) ドリフト補償技術の開発

テラヘルツ帯スペクトル評価技術によって、目的外の不要信号の存在を確認しつつ、ドリフト要

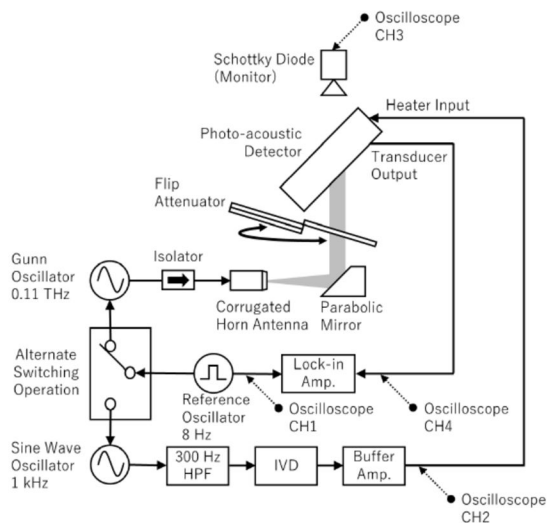


図 4 光音響置換法によるテラヘルツ減衰量校正装置のブロック図
(Iida et al., IEEE Trans. Instrum. Meas., (2021) 70, 1-6)

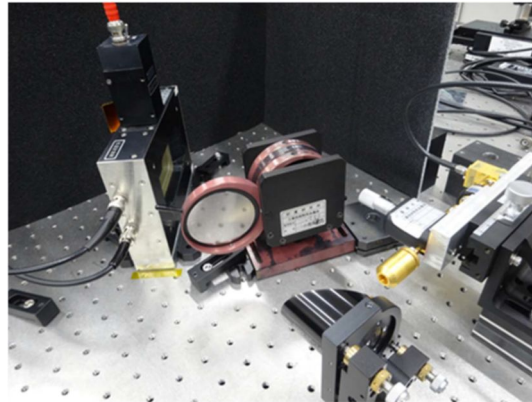


図 5 テラヘルツ減衰量校正装置の外観
(Iida et al., IEEE Trans. Instrum. Meas., (2021) 70, 1-6)

表 1 テラヘルツ減衰量校正の不確かさバジェット
(Iida et al., IEEE Trans. Instrum. Meas., (2021) 70, 1-6)

Source of uncertainty	Type	Probability distribution	Attenuation			
			5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
			Uncertainty contribution (dB)			
u_1 IVD	B	rectangular	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
u_2 Loading effect	B	rectangular	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
u_3 Linearity	B	rectangular	0.0006	0.0006	0.005	0.009
u_4 Source stability	B	rectangular	0.052	0.052	0.052	0.052
u_5 Harmonics	B	rectangular	0.075	0.075	0.075	0.075
u_6 Incident angle	B	rectangular	0.120	0.120	0.120	0.120
u_7 Polarization	B	rectangular	0.054	0.054	0.054	0.054
u_8 Uniformity	B	rectangular	0.120	0.120	0.120	0.120
u_9 Random	A	normal	0.005	0.015	0.012	0.105
Combined standard uncertainty			0.20	0.20	0.20	0.23
Expanded uncertainty ($k = 2$)			0.40	0.40	0.40	0.46

因を調査した。調査の結果、ドリフト要因としては目的外信号による外乱ではなく、周囲温度変動の影響が大きいことが分かった。本カロリメータでは、温度変動の影響を軽減するため、同一の特性を有するセンサを二つ用いた双子型構造を採用し、一方をテラヘルツ波パワー測定用に、もう一方を温度補償用に利用する。原理的に、二つのセンサが完全に同一特性であればドリフトをキャンセルできるが、僅かなばらつきがあることによってドリフトが発生することが明らかとなった。そこで、その僅かな差分を補償するコンプリメンタリ補償回路を検討した。具体的には、可変利得増幅器を二つのセンサにそれぞれ設けてその出力を差動増幅する。カロリメータに信号入力がない状態（バックグラウンド時）において、差動増幅出力が一定となるように可変利得増幅器の利得をあらかじめ調整しておくことでドリフトを軽減することに成功した。

(4) カロリメータの等温制御アルゴリズムの改善

ドリフトの要因としては、前述の周囲温度変動の影響の他に、装置起動時のアルゴリズムに問題があることが分かった。本カロリメータでは、入射したテラヘルツ波のパワーを、ヒータによる熱を介して直流の電力に置換して測定している。装置の立ち上げ時には、テラヘルツ波パワーと直流ヒータ電力の平衡状態を保つように帰還制御が働くが、ヒータがオーバードライブされることによってドリフトレートが増大することが判明した。そこで、ヒータ制御にリミッタを設けて過加熱を防止する仕組みを前述のドリフト補償回路に実装した。その結果、特にナノワットレベルの微弱パワーを測定する際において、ヒータの過加熱がなくなり測定開始の平衡状態に達するまでの時間短縮が可能となった。

これらの結果、リアルタイムドリフト補償の基本技術を実証し、測定時間の高速化を実現するとともに、微弱パワー測定の不確かさ評価に関する重要技術の開発に成功した。これまで確立されていなかったテラヘルツ波パワーの標準及び校正技術の発展に大きく貢献するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hitoshi Iida and Moto Kinoshita	4. 巻 70
2. 論文標題 Photoacoustic Substitution Method for Calibrating Subterahertz Attenuation in Free Space	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIM.2021.3060577	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 飯田 仁志	4. 巻 50
2. 論文標題 テラヘルツ波パワー測定の基礎と最新動向	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JEMIC計測サークルニュース	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hitoshi Iida, Moto Kinoshita and Yuya Tojima	4. 巻 40
2. 論文標題 Terahertz Spectrum Analyzer Based on Fourier Transform Interferometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 952-961
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10762-019-00620-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hitoshi Iida and Moto Kinoshita
2. 発表標題 Measurement of terahertz attenuation using a photo-acoustic substitution method
3. 学会等名 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯田 仁志、木下 基
2. 発表標題 テラヘルツ波空間ビームの高信頼定量計測技術の開発
3. 学会等名 2020年度計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木下 基、東島 侑矢、飯田 仁志
2. 発表標題 ミリ波・テラヘルツ波パワーの計量・計測技術
3. 学会等名 学振テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会第49回研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	木下 基 (Kinoshita Moto) (00415671)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------