

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18118

研究課題名(和文) テラヘルツセンサの線形性自己校正技術の開発

研究課題名(英文) Development of self-calibration technique of terahertz sensor linearity

研究代表者

木下 基 (Kinoshita, Moto)

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：00415671

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：現在、広く用いられているテラヘルツ波分光装置はテラヘルツ波センサの線形性を基準として、サンプルの透過率や反射率を測定している。このようなテラヘルツ波の応用を支えるため、本研究ではテラヘルツ波センサの線形性自己校正システムを開発した。本システムは重ね合わせ法に基づき、テラヘルツ波信号の単純な和算に対するセンサの応答の線形性を検証する。本研究では、独自の工夫により複数のワイヤグリッド偏光子を組み合わせることで、自己校正システムを構築した。このシステムによってテラヘルツ波パワーメータを校正し、概ね1%以下の非線形性を得た。本結果は、テラヘルツ波の応用を支える基盤としての役割を果たす。

研究成果の概要(英文)：Terahertz spectrometers, which measure transmittance and reflectance of a sample by referring to the linearity of a terahertz wave sensor, are widely used in recent years. In order to support the applications of terahertz waves, the linearity self-calibration system for terahertz wave sensors was developed in this research. This system verifies the linearity of the response of a terahertz sensor to a simple summation of terahertz wave signals based on the superposition method.

In this research, the self-calibration system was uniquely constructed by combining wire-grid polarizers. Using this system, a commercial terahertz wave power meter was calibrated, and the nonlinearity of approximately less than 1% was obtained. This result is expected to be a foundation that supports the application of terahertz waves.

研究分野：計測工学

キーワード：テラヘルツ波 線形性・応答直線性 重ね合わせ法・重畳法 自己校正 計測工学 センサ

1. 研究開始当初の背景

電波と光の狭間にあるテラヘルツ波帯は長年未開拓であったが、近年、高強度発信源や高感度受信器などの発展により、多くのアプリケーションが一般に使われ始めている。とりわけ、様々な物質のテラヘルツ波帯における分光情報やイメージングが得られるテラヘルツ波時間領域分光装置 (THz-TDS) などの普及は目覚ましい。一方で、テラヘルツ波を含む電磁波を公共利用する場合、複数のテラヘルツシステムの両立性や、互いのパラメータを複数の人々で共有のために、テラヘルツ波に関する計量標準の確立が急がれる。

我が国のテラヘルツ波に関する計量標準を担う当グループにおいては本研究開始当時までに、室温で高感度に測定可能な等温制御型カロリメータを用いたパワー標準や、光の波長を用いてテラヘルツ波周波数を校正可能なテラヘルツ波エアギャップエタロンなどの開発を行ってきた [1] - [3]。パワーと周波数は、電磁波に関する非常に重要なパラメータであるが、上述の通り THz-TDS などが広く普及している現状において、センサの線形性 (応答直線性) もまた極めて重要なパラメータである。THz-TDS は、サンプルに対してテラヘルツ波を照射し、その透過波や反射波を測定するものである。そして、サンプルの有無や基準サンプルによる透過波や反射波の強度比から、サンプルの透過率、反射率が算出される。さらにこれらを基に、吸収率や屈折率といった様々な物性も得られる。従って、信号の強度比、つまりテラヘルツ波センサの線形性は、THz-TDS を始めとしたテラヘルツ波物性の精度を決定する基本量であり、この精密測定技術の開発はテラヘルツ波の普及において重要な役割を果たす。

2. 研究の目的

本研究ではテラヘルツ波帯において、実用的なセンサの線形性校正技術を開発する。センサの線形性に関する計量標準は、電波において高周波減衰量標準として知られている。高周波減衰量標準からの周波数拡張によりテラヘルツ波センサの線形性校正を確立するためには、高精度かつ高効率な周波数逓倍器やミキサが必要となるが、現状では難しい。従って、テラヘルツ波を用いて直接校正する方法が現実的である。また、減衰器の基準器が確立されていないテラヘルツ波帯において、センサ自身で自己校正を行う方式が有利である。

3. 研究の方法

本研究では、重ね合わせ法または重畳法と呼ばれる方式を用いる。重ね合わせ法では、「1+1=2」という単純な和算の検証を行うことで、センサの線形性の自己校正が可能となる。まず、被校正センサに任意の強さのテラヘルツ波 A を入射し、この応答 P_A を測定する。次に A とほぼ同じ強度のテラヘルツ波 B

を入射し、同じく応答 P_B を測定する。最後に A と B を同時に入射したときの応答 P_{AB} を得る。この結果、

$$P_A + P_B = P_{AB} \quad (1)$$

となるかを検証する。ここで、 $P_A \approx P_B$ なので (1) を規格化したものが上述の「1+1=2」の意味である。「A とほぼ同じ強度のテラヘルツ波 B」と述べたが、実際には P_A を目安にして、 $P_A \approx P_B$ となるように可変減衰器などを用いて、 P_B を調整するのが現実的である。 $P_A \approx P_B$ とするのが本原理の要点で、 P_A と P_B の値が大きく異なる、例えば「1+2=3」などでは意味が無い。この場合、1 と 2 の比、つまり $P_B = 2P_A$ という関係を検証する手段が被校正センサの線形性に依っているためである。従って、未知の量を同じく未知の量で校正するという循環に陥ってしまう。ただし、一度「1+1=2」が検証できた後には、校正された「1」と「2」の線形性を利用して「1+2=3」の検証が可能である。または、改めて「2+2=4」、「4+4=8」、「8+8=16」、... と続けることで、信号強度が許す限り、測定レンジを尺取り虫の要領で無限に拡張することができる。

定量的に、被校正センサの非線形性 η は、上記のように測定した P_A 、 P_B 、 P_{AB} を用いて、

$$\eta = \frac{P_{AB}}{P_A + P_B} - 1 \quad (2)$$

で定義される。被校正センサに式 (2) の値を付加することで、線形性の校正が行われる。また、校正には定量的な不確かさを付加する必要がある。

4. 研究成果

今回、開発したテラヘルツ波センサの線形性自己校正システムを図 1 に示す。本研究では、原理検証のため、110 GHz の単一周波数において実験を行った。ガンダイオードにより発振されたテラヘルツ波は、コルゲートホーンアンテナによってビーム状に空間に放射される。本システムは独自の工夫によって、2 つのワイヤグリッド偏光子を組み合わせで構築されている。テラヘルツ波はワイヤグリッド偏光子 #1 によって偏波成分別に、光路 A と B に分岐される。その後、2 つ目のワイヤグリッド偏光子 #2 によって再び結合され、まとめて被校正センサに入射される。測定時に A および B それぞれの光路に遮蔽物を置くことで、 P_A および P_B が得られ、両光路を同時に開くことで P_{AB} が得られる。ワイヤグリッド偏光子 #1 の角度によって信号の分岐比が調整可能であり、これによって $P_A \approx P_B$ が実現できる。ワイヤグリッド偏光子 #2 の角度は、両光路を効率良く結合するために、#1 と直交する角度に合わせる。ここで、ワイヤグリッド偏光子によって分岐された A と B の偏光方

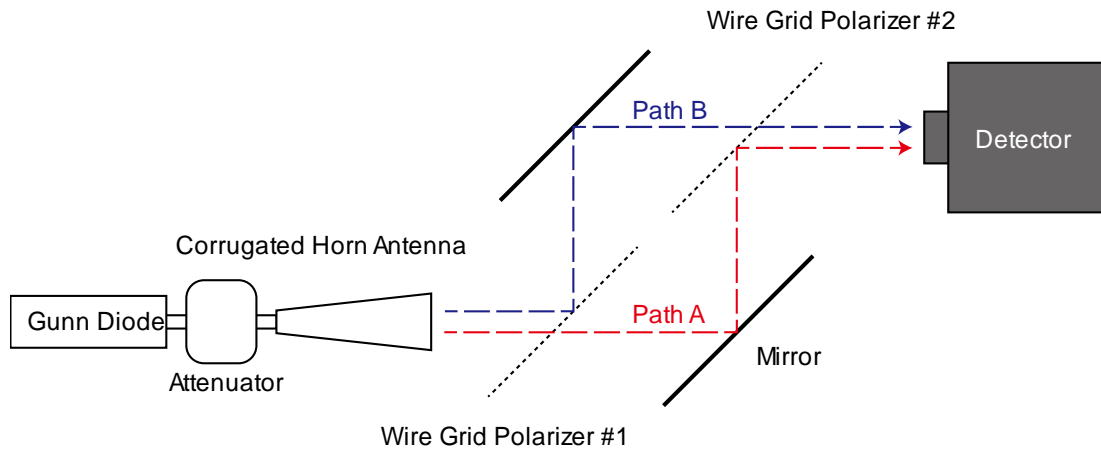


図1 テラヘルツ波センサの線形性自己校正システム
 信号源（ガンダイオード）からの信号をワイヤグリッド偏光子によって2つに分岐し、それぞれ光路 A と B とする。その後、再びワイヤグリッド偏光子によって合成し、検出器に入射させる。それぞれの光路を遮蔽物を置くことで光路を閉じることができる。

向は直交しているため、再結合後に互いに干渉しないことも、本システムの特徴である。もし A と B が干渉し合う場合、式(1)は成り立たないため、大きな非線形性として誤認される。このように、本システムでは、2つのワイヤグリッド偏光子の組み合わせによって、信号強度比の調整機能を有するとともに非干渉性が確保される。

図2に、本システムに用いたワイヤグリッド偏光子の透過率を示す。透過率測定には THz-TDS を用いた。ワイヤグリッド偏光子の角度は透過率が最大となる角度を0度と定義して、45度、90度と変化させたときの透過率を測定した。図2より、ワイヤグリッド偏光子の消光比は0.2%ほどであることがわかる。従って、上記議論において、最大で0.2%の波は偏光分離ができず、干渉する恐れがある。この0.2%を偏光分離度の上限として、測定の不確かさに加えた。

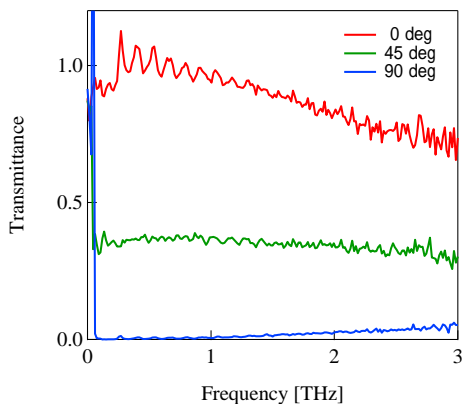


図2 ワイヤグリッド偏光子の透過率
 ワイヤグリッド偏光子の角度を0度、45度、90度に変えて測定した。110 GHzにおける消光比は0.2%ほどである。

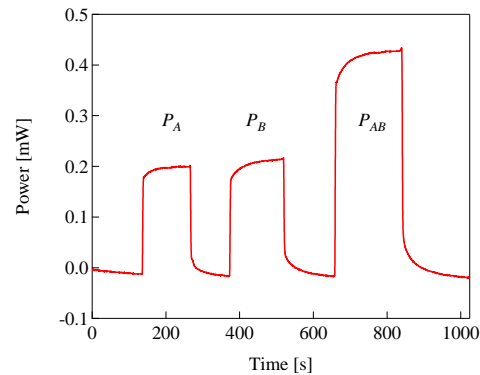


図3 光路別のパワー測定
 まず光路 A を開けて P_A を、次に光路 B を開けて P_B を、最後に光路 A および B を開けて P_{AB} を測定した。背景ノイズとドリフトを補正するために、各パワー測定の前・後で両光路を閉じた場合のパワー測定を行った。

上記のシステムを用いて、テラヘルツ波パワーメータの線形性校正を行った。被校正パワーメータは熱測定を原理とした市販品である。図3に光路 A、B、および両者を同時に開いた場合のパワー測定の結果を示す。パワー測定は、テラヘルツ波を出力したまま、遮蔽物によってそれぞれの光路を塞ぐことで光路 A および B のパワーを測定し、さらに両者を開いた場合のパワーを測定した。ここで、背景ノイズとそのドリフトを補正するために、光路 A と B 両者を遮蔽した場合のパワーを、それぞれの測定の前・後において得た。それぞれの光路のパワー測定の結果から、前後の背景ノイズの平均値を引くことで、 P_A 、 P_B 、 P_{AB} が得られた。

各パワーレベルにおいて、図3と同様のパワー測定を行い、式(2)を用いて、テラヘルツ波パワーメータの非線形性を求めた結果を図4に示す。測定は2~450 μW のパワーレンジにおいて行い、最大4%、概ね1%以

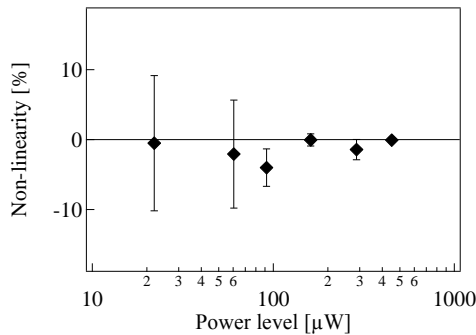


図4 テラヘルツ波パワーメータの非線形性
開発したテラヘルツ波センサの線形性自己
校正システムを用いて、市販のテラヘルツ波
パワーメータの非線形性校正を行った。

下の非線形性が得られた。図4の各点のエラーバーは本実験における標準不確かさを表す。今回の測定の不確かさは、式(2)を参考にして、

$$|u(\eta)|^2 = \left| \frac{-P_{AB}}{(P_A+P_B)^2} u(P_A) \right|^2 + \left| \frac{-P_{AB}}{(P_A+P_B)^2} u(P_B) \right|^2 + \left| \frac{1}{P_A+P_B} u(P_{AB}) \right|^2 + |s(\eta)|^2 \quad (3)$$

として見積もられた。 $s(\eta)$ は繰り返し測定における平均値の実験標準偏差であり、Aタイプの不確かさ(統計的な手法によって算出された不確かさ)に分類される。Bタイプの不確かさは、Aタイプ以外のものとされ、式(3)における右辺の $s(\eta)$ 以外の3項が該当する。 $u(P_A)$ 、 $u(P_B)$ 、 $u(P_{AB})$ はそれぞれのパワー測定における標準不確かさで、上述のワイヤグリッド偏光子の消光比による不確かさと、パワーメータの分解能による不確かさを二乗和平方根によって合成したものである。以上の不確かさを、二乗和平方根によって合成することで図4のエラーバーが得られた。

本結果は、重ね合わせ法によってテラヘルツ波パワーメータの線形性を定量的に、さらに測定の不確かさを付加して測定(校正)した初めての例である。線形性が校正された本パワーメータのようなテラヘルツ波センサを用いれば、線形性標準の仲介器となる減衰量標準器の校正や、THz-TDSの受光器のような他のセンサの校正が可能となる。従って、本結果はTHz-TDS等を基礎とするテラヘルツ波の応用を支える基盤としての役割を果たし、科学技術の発展に貢献する。

<引用文献>

- [1] H. Iida, M. Kinoshita, K. Amemiya, Y. Shimada, "Calorimetric measurement of absolute terahertz power at the sub-microwatt level," *Optics Letters*,

volume 39, Issue 6, pp. 1609 - 1612 (2014)

- [2] Moto Kinoshita, Hitoshi Iida, and Yoza Shimada, "Frequency Calibration of Terahertz Time-Domain Spectrometer Using Air-Gap Etalon," *IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY*, VOL. 4, NO. 6, pp. 756-759, NOVEMBER 2014
- [3] Yoza Shimada, Hitoshi Iida, and Moto Kinoshita, "Recent Research Trends of Terahertz Measurement Standards," *IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY*, VOL. 5, NO. 6, pp. 1166-1172, NOVEMBER 2015

5. 主な発表論文等

[学会発表](計7件)

木下基、飯田仁志、"重ね合わせ法によるテラヘルツ波センサの非直線性自己校正に関する研究"2017年度計量標準総合センター成果発表会、(2018/02/02)

Moto Kinoshita, Hitoshi Iida, "Non-linearity measurement of THz power meter by superposition method," *MTSA2017*, Okayama, (2017/11/20)

【依頼講演】Moto Kinoshita, "Precise power measurements of electromagnetic waves including microwave, millimeter-wave and terahertz-wave," *Emerging Scientist Workshop 2017*, Selected oral presentation, (2017/08/30)

Moto Kinoshita, "Precise power measurements of electromagnetic waves including microwave, millimeter-wave and terahertz-wave," *Emerging Scientist Workshop 2017*, poster presentation, P-14, (2017/08/30)

【招待講演】木下基、飯田仁志、藤井勝巳、"テラヘルツ波パワーの精密計測技術と計量標準"学振テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会第31回委員会・研究会(2017/04/19)

木下基、飯田仁志、"テラヘルツ波センサの線形性自己校正システムに関する研究開発"2016年度計量標準総合センター成果発表会(2017/01/26)

【依頼講演】木下基、飯田仁志、島岡一博、平義隆、雨宮邦招、藤井勝巳、"ミリ波およびテラヘルツ波のパワー計測"電気学会計測研究会(2016/06/24)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

木下 基 (KINOSHITA, Moto)

国立研究開発法人産業技術総合研究所

・物理計測標準研究部門

研究者番号 : 00415671