

8-2 テラヘルツ帯遠隔分光センシングシステム

8-2 Stand-off Gas Sensing System Based on Terahertz Spectroscopy

清水直文 古田知史 神代 暁 水津光司 門 勇一 小宮山 進
SHIMIZU Naofumi, FURUTA Tomofumi, KOHJIRO Satoshi, SUIZU Koji,
KADO Yuichi, and KOMIYAMA Susumu

要旨

テラヘルツ電磁波の特性を活用して、被災現場等における危険ガスの存在を遠隔から分光センシングするシステムの実現を目指している。検討を進めている分光システムの概要を述べるとともに、主要構成要素であるテラヘルツ波送受信器の開発状況について報告する。

We launched into a development of a new stand-off gas sensing system that can detect hazardous gases in disaster areas utilizing terahertz technology. This paper gives the outline of the system under development. The latest results of our research on terahertz transmitter and receiver are also presented.

[キーワード]

テラヘルツ電磁波, 遠隔, 分光センシング, 有毒ガス, スペクトル, 吸収線
Terahertz electromagnetic wave, Remote, Stand-off sensing, Spectroscopy, Hazardous gas, Absorption line

1 はじめに

遠隔分光センシング応用の観点から特筆すべきテラヘルツ電磁波の特長は、(1)マイクロ波やミリ波帯の電波に比べて一けた以上周波数が高い(短波長である)ため、測定対象に向けて小さなスポットにエネルギーを集中させることが容易であること、(2)赤外線や可視光に比べると波長が長いため大気中伝搬において塵、煤、煙などによる散乱が少なく、かつ人体への影響が小さいこと、(3)多くの物質が固有の吸収線、いわゆる指紋スペクトルをこの電磁波帯に有していること、などである。

これらのテラヘルツ電磁波の特長を、大規模地震などの災害発生時における遠隔分光センシングやイメージング(画像化)に活用すれば、従来技術(X線、赤外線、マイクロ波、ミリ波)では実現できなかった新しい情報収集が可能となり、さらに得られた情報の迅速な流通と利用によって、被災者救援や二次災害防止などに役立て、災害被害を

最小限に抑えることに貢献できると考えられる。このような考えの下、我々は独立行政法人 情報通信研究機構(NICT)の委託を受け、平成18年度から5年間の計画で「ICTによる安全・安心を実現するためのテラヘルツ波技術の研究開発」を進めている。

以下ではテラヘルツ帯遠隔分光センシングシステムの概要と、システムにおいて重要な構成要素であるテラヘルツ波送受信器の開発状況を紹介する。また、最後に関連テラヘルツ波分野の研究を推進しているNICT自主研究部門との有効な連携の可能性について述べる。

2 テラヘルツ帯遠隔分光センシングの概要

災害現場などで危険なガスを遠隔から検知するためのテラヘルツ帯分光センシングシステムの方法としては、パッシブ方式とアクティブ方式が考えられる。災害現場では測定すべき危険ガスの背

景に様々な高温物体が存在するため、ガス分子が自ら放射する電磁波のスペクトルでガスを特定するパッシブ方式よりも、テラヘルツ波を離れた場所にある構造物や建材などに照射し、それらからの散乱・反射波を受信し分光するアクティブ方式の方が高感度化に向くと予測される。本研究開発プロジェクトでは、大気中でのテラヘルツ波の伝搬損失[1]、テラヘルツ領域におけるガス分子の吸収線に関する性質[2]、5年間の研究開発での送受信器の動作周波数の向上の見通しなどを勘案し、0.2～1 THz帯のテラヘルツ波を用いる分光システムの構築を目標として掲げている。

図1は、我々が開発を進めている遠隔分光センシングシステムの具体的な動作原理を表したものである。テラヘルツ送受信器から送られた周波数 $f_1 \sim f_3$ のテラヘルツ波は、壁によって反射され、受信器によって受信される。送受信器と壁の間に、特定の周波数 f_2 付近に吸収線を持つガスが存在する場合、この周波数のテラヘルツ波の受信レベルは、他の周波数に比べて下がることになる。したがって、検知すべきガスの吸収線をカバーする周波数のテラヘルツ波を目標物に向けて照射し、反射して戻ってくるテラヘルツ波のスペクトルを観測することで、目標物付近で発生するガスを検知することができる。

このような遠隔分光センシングシステムのハードウェアの実現には、高安定、狭線幅で周波数連続可変の高出力テラヘルツ波送信器、短時間計測に資する高感度なテラヘルツ波受信器が不可欠である。このうちテラヘルツ波送信器としては、光変調器により発生させた光サイドバン

ド信号の任意の2波長(周波数)を光フィルタで選択して合波し、単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)に入力することにより、高出力のテラヘルツ波を発生させる方法[3][4]を採用する。また受信器には、テラヘルツ帯で現在最も低雑音である超伝導トンネル型(SIS)ミキサを用いたヘテロダイン検出法を採用する[5]。本プロジェクトでは最初の2年間で、200-500 GHzの送受信技術を基盤技術として確立することとした。以下ではこの途中経過を報告する。

3 システム要素技術開発の状況

(1) 光サイドバンド信号発生器

テラヘルツ波送信器の構成は図2のとおりである。単一モードレーザで発生する光から、光位相変調器(PM)による変調と非線形光ファイバ(DDF)中での自己位相変調効果を利用して広帯域光サイドバンド信号を発生させる。図3は、PMを25 GHzで駆動したときのDDFの出力である。500 GHzまでの光サイドバンド信号のレベル差は ± 4 dB以内である。ここからアレイ導波路回折格子(AWG)で、光サイドバンド信号を各モードの光信号に分割し、次段の光スイッチでそこから二つの光信号を選択、カップラで合波する。このような構成を取った場合、①光スイッチにより選択するモードを変える、②PM変調信号の周波数をシフトさせ、選択する二つの信号の周波数差を微小に調整する、の二つを組み合わせることにより光ビート信号の周波数連続掃引が可能となる。図4は光カップラ出力である。ここでは周波数

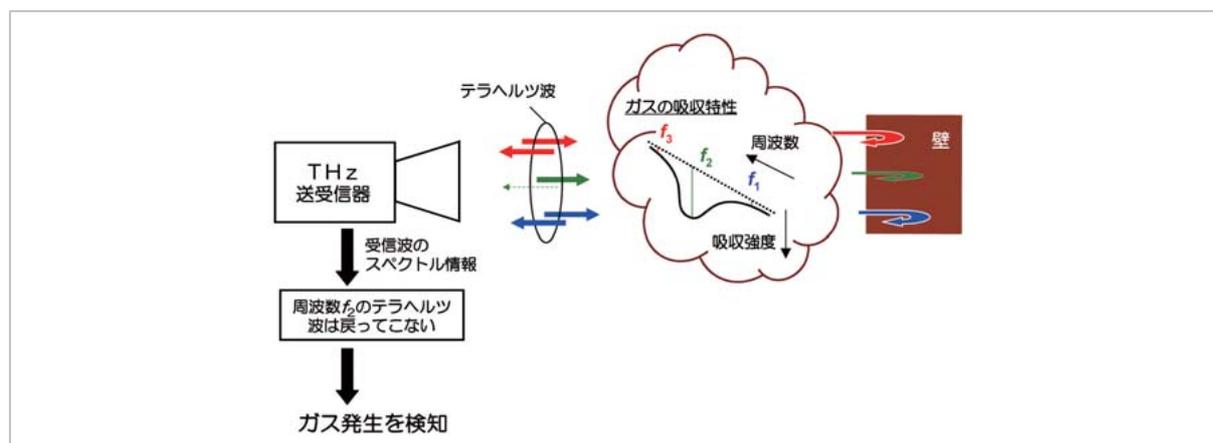


図1 テラヘルツ帯遠隔分光センシングシステムの動作原理

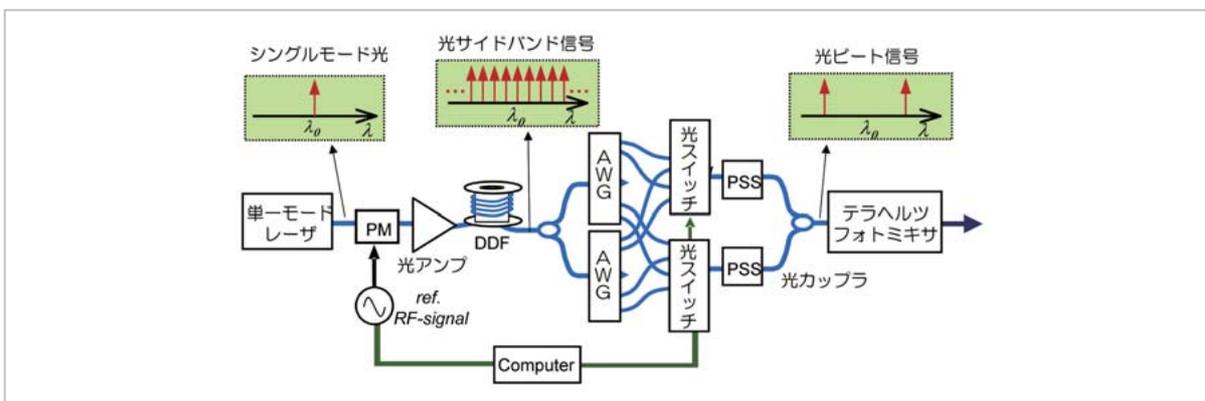


図2 テラヘルツ波送信器の構成

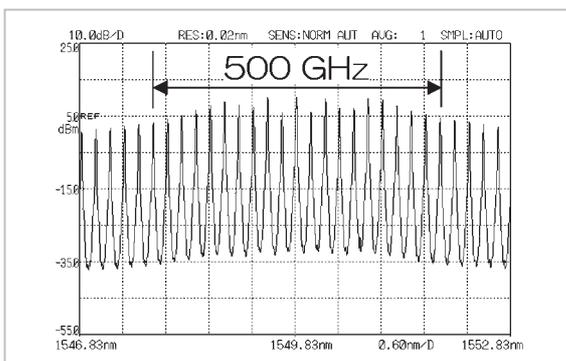


図3 DDF 出力のスペクトル

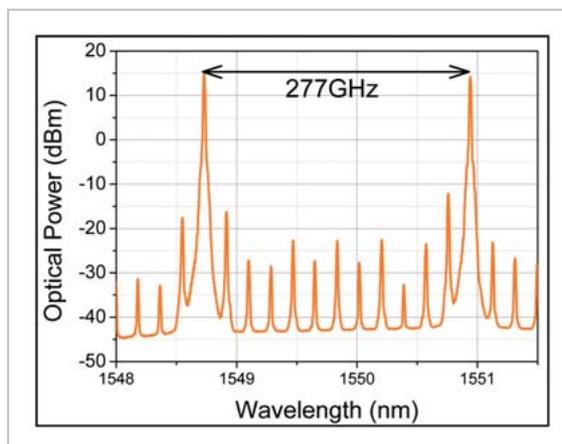


図4 光カップラ出力

277 GHz の光ビート信号を取り出している。光信号 CN 比は 50 dB 以上あり、スプリアス抑圧比 (所望信号強度/不要光信号強度) も 25 dB 以上である。フォトミキサ入力パワー P_{in} とテラヘルツ波放射パワー P_{THz} との関係 $P_{THz} \propto P_{in}^2$ から、本構成で発生させたテラヘルツ波のスプリアス抑圧比は 50 dB 以上と判断できる。

(2) テラヘルツフォトミキサモジュール

本研究開発においては、テラヘルツ波帯で高い出力特性を持つ UTC-PD モジュールの実現が不可欠である。実用的な観点から我々は、バタフライ型パッケージ、導波管出力型構成及びオーバーモード動作の方式を採用した。導波管出力型構成でオーバーモード動作を実現するためには、高次モードの発生を抑制することが重要となる。そのため、3次元電磁界解析を用いてモジュール構成の最適化を行い、200 ~ 500 GHz 帯において、高次モードの発生を 30dB 以下に抑制した。図5は試作した J バンド帯 UTC-PD モジュールの特性である。動作周波数 200 ~ 500 GHz をカバーするこのモジュールは 350 GHz で最大出力 200 μ W

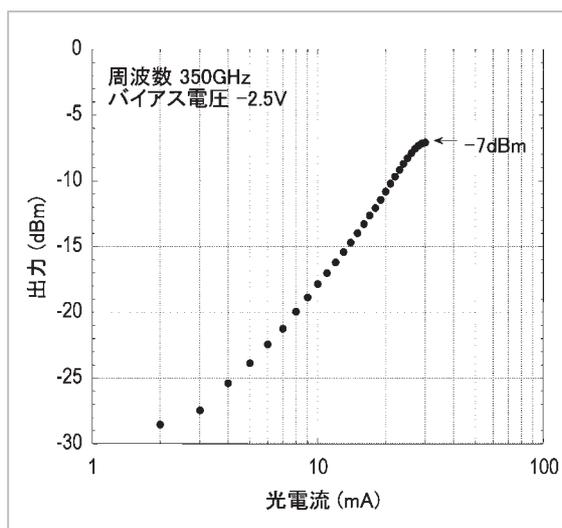


図5 フォトミキサの出力特性

を示した。

(3) SIS ミキサ受信器

現在開発中の SIS ミキサは、極めて薄い電子のトンネルバリア (約 1 nm の酸化アルミニウム) を

二つの超伝導体(ニオブ)でサンドイッチ状に挟んだ構造を有している。その電流-電圧特性の非線形性を利用して、テラヘルツ電磁波をマイクロ波帯の出力信号に変換する。この SIS ミキサを 200 ~ 500 GHz という広帯域で動作させるため、 N 個の並列型多接合素子により、接合容量とマイクロストリップラインインダクタンスとの共振周波数を $N-1$ 個作り出し、これらを周波数軸上で近接配置する手法を採用した。図 6 は試作した SIS ミキサチップ ($N=8$) の中心部と受信器雑音温度の評価結果を示す。230 ~ 444 GHz にわたり 700 K (量子限界の 30 倍) 以下の雑音温度を得てい

る。3 dB 帯域は、従来報告されている SIS ミキサの RF 比帯域におけるトップデータに匹敵する、中心周波数の 63% であった。なお、標記測定は、NICT 未来 ICT センターの王 鎮氏、齋藤伸吾氏、武田正典氏のご協力によるものである。

(4) テラヘルツ帯ガス分光

開発した光サイドバンド信号発生器とフォトミキサモジュールによるテラヘルツ波送信器がガス分光に適用可能性を明らかにすることを目的に、笑気ガス (N_2O) の吸収特性を評価した。 N_2O はサブテラヘルツ帯に、回転準位間の遷移に起因する 25 GHz 周期の吸収線を有するが[6]、図 7 に示す

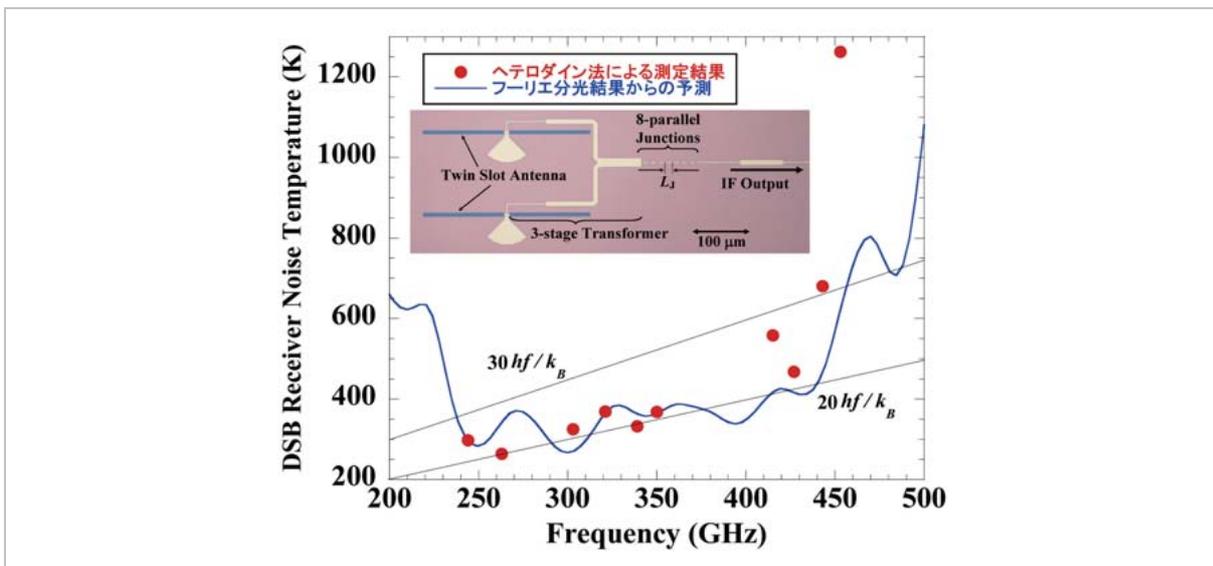


図6 受信器雑音温度の周波数依存性

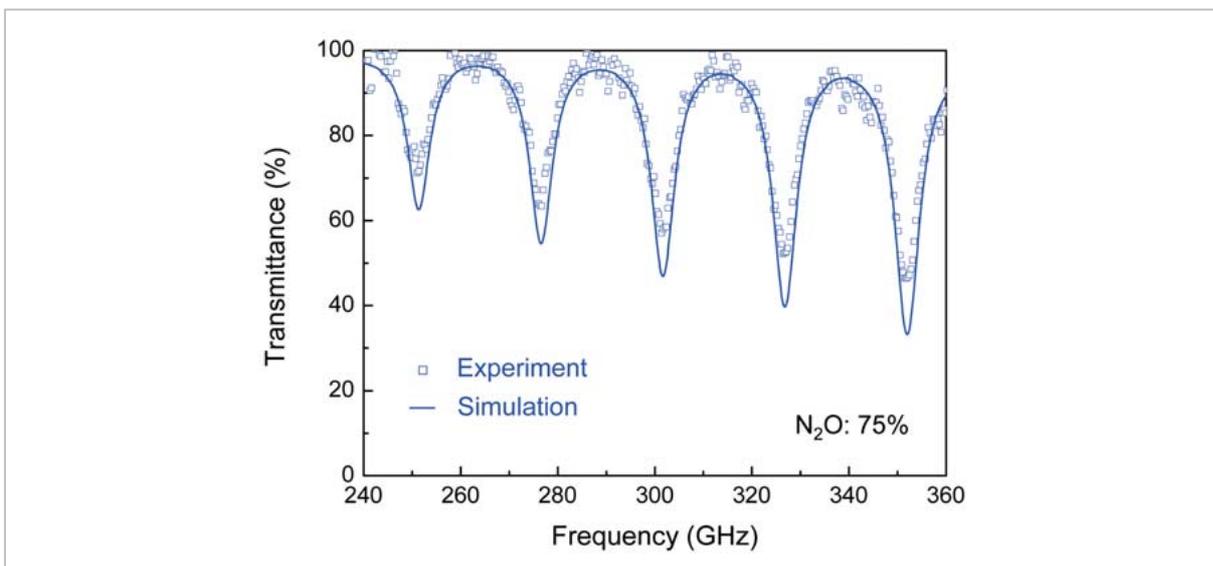


図7 笑気ガスの吸収スペクトル

ようにこれら吸収線が明瞭に観測できた。また、分子透過吸収スペクトルデータベース Hitran [7] を基に計算したスペクトルともよく一致した。この結果は、今回開発したテラヘルツ送信器が高い周波数精度を有し、その線幅がガス分光に適用できる十分な細さを有することを示している。

4 NICT自主研究部門との連携

実測スペクトルからガス濃度を正確に導出するために欠くことができないテラヘルツ波の高精度な大気伝搬モデルや各種材料のテラヘルツ帯スペクトルデータベースは、テラヘルツ波技術が広く産業化していくために必要な基盤技術でもある。したがって、これらを NICT 自主研究部門と連携しながら開発していくことは、安全・安心の実現のみならず計測・通信・医療など幅広い分野にも貢献することになると考えられる。また、現在開発中の SIS ミキサの超伝導体に用いているニオブは、700 GHz 付近に超伝導ギャップが存在する。そのため 700 GHz 以上の周波数ではミキサの性能が低下することが懸念されている。これに対して

NICT 自主研究部門は 700 GHz 以上でも特性劣化のない窒化ニオブを超伝導体材料に用いる SIS ミキサの製作技術を保有している [8]。したがって、NICT 自主研究部門と連携により、0.5-1 THz 帯テラヘルツ波受信器開発がより効率的に進めることができると期待される。

5 むすび

本文では NICT の委託を受け、平成 18 年度から 5 年間の計画で開始した「ICT による安全・安心を実現するためのテラヘルツ波技術の研究開発」で実現を目指すテラヘルツ帯遠隔分光センシングシステムの概要と、現時点でのハードウェアの開発状況を紹介した。本研究の立ち上げにご尽力され、また現在も研究開発全般にわたってご指導いただいております永妻忠夫 NTT リサーチプロフェッサ兼大阪大学大学院教授、研究受託メンバーの一員としてシステム開発に向けてご議論いただいている有限会社スペクトルデザインの深澤亮一様、日本ガイシ株式会社の三富 修様に感謝いたします。

参考文献

- 1 “テラヘルツテクノロジー動向調査報告書”，財団法人テレコム先端技術研究支援センター，2005年3月。
- 2 S. Svanberg, "Atomic and Molecular Spectroscopy: Basic Aspects and Practical Applications", Fourth Edition, Springer, 2004.
- 3 H. Ito, T. Furuta, Y. Muramoto, T. Ito, and T. Ishibashi, "Photonic millimetre- and sub-millimetrewave generation using J-band rectangular waveguide-output uni-travelling-carrier photodiode module", Electron. Lett. Vol.42, p.1424, 2006.
- 4 A. Hirata, H. Togo, N. Shimizu, H. Takahashi, K. Okamoto, and T. Nagatsuma, "Low-Phase Noise Photonic Millimeter-Wave Generator Using an AWG Integrated with a 3-dB Combiner", IEICE Trans. Electron, Vol.E88-C, No.7, pp.1458-1464, 2005.
- 5 S. Kohjiro, Y. Uzawa, J. Inatani, T. Nagatsuma, H. Ito, Z. Wang, and A. Shoji, "Quasi-optical Superconducting Heterodyne Receiver Using a Photonic Local Oscillator in the Submillimeter-wave Region", Ext.-Abstract 18B-6, International Workshop on Terahertz Technology, 16-18 Nov.2005, Osaka, Japan.
- 6 H. Harde and D. Grischkowsky, "Coherent transients excited by subpicosecond pulses of terahertz radiation", J. Opt. Soc. Am. B, Vol.8, No.8, pp.1642-1651.
- 7 HITRAN homepage, <http://cfa-www.harvard.edu/hitran/welcometop.html>
- 8 王 鎮, “超伝導デバイスをを用いたテラヘルツ波検出器”, 応用物理, Vol.75, No.2, pp.218-222.

しみず なおみ
清水直文

日本電信電話株式会社 NTT マイクロシステムインテグレーション研究所スマートデバイス研究部主任研究員 博士(工学)
超高周波デバイス、マイクロ波フォトニクス

かみしろ ともみ
神代 暁

独立行政法人産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門主任研究員 工学博士
超伝導エレクトロニクス

かど ゆういち
門 勇一

日本電信電話株式会社 NTT マイクロシステムインテグレーション研究所スマートデバイス研究部部長 工学博士
低電力デバイス、ユビキタス通信技術

ふる たかともみ
古田知史

日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所先端光エレクトロニクス研究部主任研究員 工学博士
超高速光受信器

みづこうじ
水津光司

名古屋大学助教 博士(工学)
非線形光学

こみやま すすむ
小宮山 進

東京大学大学院総合文化研究科関連基礎科学系教授 理学博士
物性物理学