

# 圧縮センシングに基づくテラヘルツレーダーチップの研究開発 (165103002)

## Study on terahertz radar chip based on compressed sensing

### 研究代表者

門内 靖明 慶應義塾大学

Yasuaki Monnai, Keio University

研究期間 平成 28 年度～平成 30 年度

### 概要

近年急速に普及している車載ミリ波レーダーよりも 1 桁以上高い分解能と 1 桁以下の小さなサイズを併せ持つテラヘルツレーダーを実現した。テラヘルツ帯電磁波は長らく未開拓領域であったが、近年では実用的な水準の送受信器が出現しつつある。しかしなお、レーダーを実現するには、ビーム走査が困難なこと、および送受信波の分離が困難なことが技術的障壁となっていた。そこで本研究では、これらの課題を回避すべく漏れ波アンテナに基づくテラヘルツレーダーを提案した。具体的には、送受信器と放射器を導波構造上に集積化し、周波数掃引しながら取得されたデータを処理して対象像を再構成できることを実証した。この成果により、例えばウェアラブル端末やドローンなどに高分解能レーダーを搭載することが可能になると考えられる。

### 1. まえがき

本研究では、近年急速に普及している車載ミリ波レーダーよりも 1 桁以上高い分解能と 1 桁以下の小さなサイズを併せ持つテラヘルツレーダーの実現を目的とする。それにより、自動車よりも小さな移動体であるドローンやウェアラブル端末などにレーダーを搭載することを可能にし、空間認識に基づく着陸支援やジェスチャ認識、バイタルサイン検出など新たな応用展開を拓くことを目指す。

テラヘルツ波の送受信技術は永らく未開拓であったが、近年では実用的な水準の送受信器が出現しつつある。しかしなお、テラヘルツレーダーの実現に向けて大きな技術的障壁となるのは、ビーム走査が困難なこと、および送受信波の分離が困難なことであり、これらはそれぞれ実用的なフェーズシフタおよびサーキュレータが存在していないことに起因する。それゆえ、テラヘルツ波を用いてレーダー計測を行うには、大掛かりなレンズや鏡を用いる空間光学系を用い、かつそれらを機械的に駆動することが不可欠であった。

そこで本研究では、これらの課題を回避する方法として、漏れ波アンテナ (Leaky-wave antenna, LWA) に基づいてレーダーを実装することを提案する。具体的には、送受信器と放射器を導波構造上に集積化するハードウェア、およびその開口面上の位相分布を周波数掃引によって変調しながらデータを取得して空間情報を再構成するソフトウェアを実現し、センサヘッド部が掌に収まるサイズのテラヘルツレーダーシステムを構築する。

### 2. 研究開発内容及び成果

#### 1. テラヘルツ帯 LWA に基づくレーダーの実証

まず、LWA を用いたレーダー計測の原理実証に取り組んだ。WR3.4 規格範囲の周波数 (220-330GHz) において動作するマイクロストリップ線路型 LWA を実装し、周波数拡張されたベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて測定された S パラメータから対象物の方向と距離を推定できることを示した。具体的には周波数掃引によってビーム走査し、その反射信号を逆フーリエ変換して時間領域信号に変換した。このとき、2 つの領域のグラフのピーク値を与える周波数・時間から、それぞれ対象物への角度と距離が求められることを示した。またこのとき、ある特定の方向に伝送される周波数スペクトル幅は有限となるため、角度方向分解能とレンジ方向分解能にはトレードオフ関係にあることを明らかにした。

#### 2. 圧縮センシングに基づく遮蔽物透過型レーダーの実証

対象の空間分布にスパース性を仮定することで、対象の 3 次元計測および遮蔽物透過型の計測が行えることを実証した。前項と同じ LWA を用いて複数の方位からビームを走査して得られる S パラメータを統合することで開口を合成し、3 次元分布を再構成した。具体的には、3 次元的に分布する対象に関するレーダー方程式を線形行列方程式の形に書き直し、対象の 3 次元分布を表すスパースなベクトルを  $l_0$  ノルム最小化問題の解として再構成した。この最適化問題を解くためには例えば OMP (Orthogonal

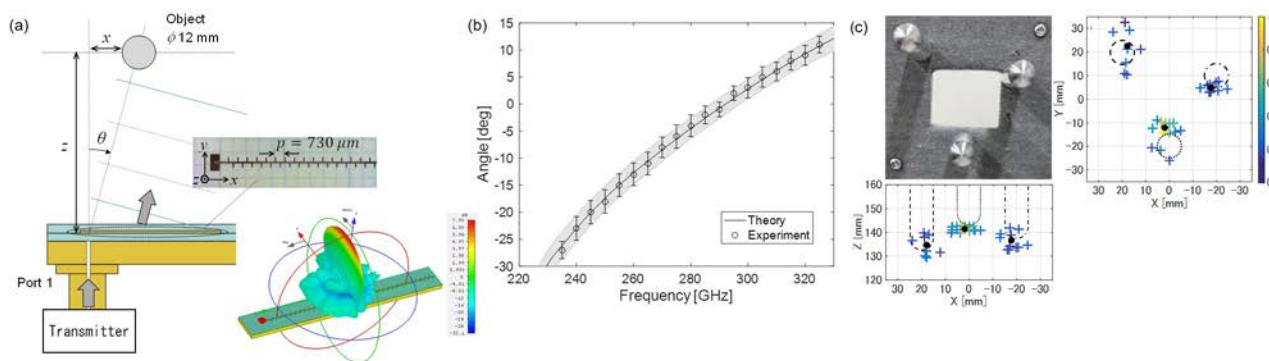


図 1 (a) LWA レーダーの概念図 (b) 周波数とビーム角の関係 (c) 3 次元計測結果

Matching Pursuit)が主要な計算方法として知られるが、ここでは制限等長性を使ってそれを高速化した CoSaMP (Compressive Sampling Matching Pursuit) を用いて求解し、VNA が出力する S パラメータから対象物の 3 次元的なレーダー断面分布を算出した。

**3. 共鳴トンネルダイオード発振出力の導波管結合の実現**  
前記 1. および 2. においてはテラヘルツ波の送受信には VNA を利用していた。一方、ここではテラヘルツ波を直接発振可能な共鳴トンネルダイオード(RTD)に注目し、その出力を導波構造中に高効率に取り出すためのカプラを実現した。具体的には、連携研究先である東京工業大学にて作製された RTD チップの出力を導波管フランジで取り出して LWA と直結できるようにした。今回用いた RTD のチップの構造自体は、T. Maekawa et al., *App. Phys. Exp.* 9 (2), 024101, (2016). と同一であるが、半導体メサ面積およびスロットアンテナ長の調整により発振周波数が 420GHz 程度となっている。従来の RTD では出力を自由空間中に直接取り出すためにチップを高抵抗シリコンレンズ上に直接マウントしていたのに対し、本研究では LWA に直結して発振出力を供給すべく、導波管フランジから出力を取り出す新たな構造を設計した。

**4. 対称ペア型 LWA によるレーダーシステムの導波集積化**  
前記 1. および 2. で原理実証したレーダーが発振器・受信器として VNA を接続して利用していたのに対して、ここではスタンドアロンなテラヘルツレーダーを実現するための方法を提案・実証した。具体的には、2 つの速波線路型 LWA を逆向きにペア配置する 3 ポートの LWA 構造を作製した。発振器としては、Amplifier-Multiplier-Chain (AMC)を、受信器としては 2 台のショットキーバリアダイオードを用いた。速波線路型 LWA は TE<sub>10</sub> モード導波管の短辺側の壁に沿って設けられたスリットをベースとし、周波数掃引範囲の下限が導波路のカットオフ周波数と一致するように LWA を設計することで、左右の LWA のビーム角を正面方向から外側に傾く方向に変化させ、空間を左右半分ずつ重複なく同時に走査できるようにした。どちらの LWA も約半分のパワーを空中に放射し、残りは放射せず終端部の検出器に導くようにすることで、互いに逆側の LWA から放射されたレーダー波を検波して対象物の距離と角度を算出できることを実証した。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取組

本研究では LWA に基づくテラヘルツレーダーを世界に先駆けて提案・実証した。提案手法により、フェーズシフタやサーキュレータといった要素技術が不要になるのみならず、レンズやハーフミラーのような大掛かりな準光学的素子も不要となり、コンパクトな集積化が達成できた。その発明内容は 2019 年 4 月 17 日に特許出願済みである。今後は、ひとつの方向性として、人のジェスチャ動作や体表面の微小振動などを高精度に検出することを目指す。実際の医療機関や福祉機関でのニーズを調査して実用上の課題を抽出し、さらに高速な AD 変換に基づく胸部トラッキングアルゴリズムを実装することで測定のロバスト性を向上させていく。

また研究提案当初には、ドローンに搭載して飛行や着陸の支援を行うことを視野に入れていた。実際、前節で述べた「3. テラヘルツ帯共鳴トンネルダイオード発振出力の導波管結合の実現」は、共鳴トンネルダイオード発振器を送

信器として用いることでバッテリー駆動可能なテラヘルツレーダーの実現を目指して取り組んだものであった。しかし、最終的に取り出した出力は 2 $\mu$ W 程度と小さかったため、「4. 対称ペア型 LWA に基づく集積レーダーシステムの実現」では数百  $\mu$ W の出力が可能な AMC を用いている。AMC には電源装置を用いた給電が必要となるので、無線で飛行するドローンに直ちに搭載することは困難であるが、今後より軽量で小型の発振器が入手可能となった場合には発振器を付け替えることで、速やかに適用可能である。

このように、今回の研究開発成果は、ヘルスマonitoring やドローンなどの分野への波及効果が考えられ、今後は個別のアプリケーションのニーズを的確に捉えて実装を進めていく方針である。

### 4. むすび

周波数掃引に基づく LWA のビーム走査により、実用的なフェーズシフタおよびサーキュレータが存在していないテラヘルツ帯においてビーム走査および送受信波の分離を行いながらレーダー計測を行う手法を提案・実証した。発振基本波発振器、AD 変換器、計測用 PC からなるコモディティ化された要素以外の部分を掌サイズに収めた。器・受信器・アンテナ・干渉計の全系が導波路ベースで構成されているため、必要最小限の寸法でフラットな集積化が可能になる。同時に、系内における送受信信号の伝送損失も最小限に抑えられる。今後は、特に人の身体やドローンの周囲空間など比較的近距离で高分解能が要求される利用場面でのニーズを抽出して、テラヘルツレーダーの実用性を高めていく。

#### 【誌上発表リスト】

- [1] K. Murano, I. Watanabe, A. Kasamatsu, S. Suzuki, M. Asada, W. Withayachumnankul, T. Tanaka, and Y. Monnai, "Low-Profile Terahertz Radar Based on Broadband Leaky-Wave Beam Steering," *IEEE Trans. THz. Sci. Tech.*, vol. 7, no.1, 2017.
- [2] K. Murata, K. Murano, I. Watanabe, A. Kasamatsu, T. Tanaka, Y. Monnai, "See-through Detection and 3D Reconstruction Using Terahertz Leaky-Wave Radar Based on Sparse Signal Processing", *J. Infrared, Milli. THz.*, vol.16, pp.210-221, 2018.
- [3] H. Matsumoto, S. Suzuki, M. Asada, and Y. Monnai, "Waveguide coupler for resonant-tunnelling diode oscillator at 420 GHz," *Electron. Lett.*, vol. 55, no. 3, pp. 140-142, 2019.

#### 【申請特許リスト】

- [1] 門内靖明、アンテナデバイス、ビームステアリングシステム、及びレーダー装置、2019 年 4 月 17 日、特願 2019-78858 号

#### 【受賞リスト】

- [1] Kosuke Murano, International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 2016 Best Poster Award, 2016 年 9 月 30 日
- [2] 村野公祐、計測自動制御学会 センシングフォーラム 研究開発奨励賞、「漏れ波アンテナを用いた近距離テラヘルツレーダーの概念実証」2017 年 9 月 1 日
- [3] 門内靖明、一般財団法人 エヌエフ基金 研究開発奨励賞、「テラヘルツ波のレーダー応用の研究」2017 年 11 月 17 日