

特集論文

安心・安全を支える テラヘルツ波センシング技術

Terahertz Wave Sensing Technology Supporting Safety and Security

梅田周作*

Shusaku Umeda

石岡和明*

Kazuaki Ishioka

早馬道也†

Michiya Hayama

仙田一郎*

Ichiro Somada

西村拓真*

Takuma Nishimura

*情報技術総合研究所

†同研究所(博士(工学))

要 旨

光波と電波の中間の周波数であるテラヘルツ波は、透過性能を確保しながら高分解能のセンシングが実現できるため、安心・安全の実現に必要な様々なアプリケーションへの適用が期待される。一方で、テラヘルツ波センシングは、近傍界での反射係数計算や歩留りの確保など、様々な技術課題が存在する。三菱電機は、300GHz帯テラヘルツ波を用いたセンシングシステムのコア技術となるデジタル信号処理技術とデバイス技術の開発、及びその有効性を明らかにするための実証実験を行った。ミリメーター級のイメージング、マイクロメーター級の変位推定を実現できた。

1. まえがき

近傍空間に存在する対象物の形状や動きをセンシングする際、これまでにはその媒体として光波と電波を用いてきた。光波はカメラやToF(Time of Flight)センサーなど、高解像度のセンシングを実現できるセンサーがある。しかしながら、光波は遮蔽に弱く、障害物の影響を大きく受けるため、隠れたモノをセンシングすることは難しい。一方、電波は光波よりも透過性能に優れているが、波長が長く、解像度の確保が困難である。

そこで近年、光波と電波双方の特長を併せ持つセンシング媒体として、テラヘルツ波が注目を集めている。テラヘルツ波は、100GHz～10THzという光波と電波の中間に位置する周波数を持つ電磁波で、障害物の背後に存在する対象も高精度・高精細にセンシングできるため、特にボディスキャナーやインフラ検査など安心・安全に関わる分野への適用が期待される。本稿では、テラヘルツ波センシングの適用が期待されるアプリケーションに触れつつ、これらのアプリケーション実現に寄与する当社の300GHz帯テラヘルツ波を用いたセンシング技術開発及びその実証実験結果について述べる。

2. 300GHz帯テラヘルツ波センシングの活用が期待されるアプリケーション

300GHz帯テラヘルツ波は、波長が約1mmと短いことから高い分解能が得られるため、同波を用いたセンシングは光波に迫る高分解能でのセンシングが期待できる。また、テラヘルツ波は電波と同様に、センチメーター級のプラスチック、フッ素樹脂などの誘電体や布、皮、木材などを透過するため、カメラでは映らない障害物背後のセンシングも可能である。X線と異なり、金属を透過することはできないが、生体への影響は小さく、安全性の高いシステムを実現できる。

300GHz帯テラヘルツ波を用いたセンシングアプリケーション例を図1に示す。これらのアプリケーションはどれも安心・安全に関連するアプリケーションであり、低遅延画像伝送を除いて、イメージング系アプリケーション及び動き検出系アプリケーションの二つに大別できる。

イメージング系アプリケーションは電波や光波の反射から対象を可視化(イメージング)するものであり、表面だけをイメージングするのであれば解像度の高い光波を用いるのが一般的だが、遮蔽物の背後に隠れるモノを高解像度にイメージングする用途では、高解像度・高精細なイメージングに加えて、透過性が必要になる。そのため、ミリメーター級の解像度とセンチメーター級の障害物透過性能を併せ持つテラヘルツ波の活用が期待される。具体的にはカバンの中や服の下の金属を検出するボディスキャナー、生産工程での製品に混入した不純物・異物検出する非破壊検査などが挙げられる。

動き検出系アプリケーションは、測定物の微細な動きを検知するアプリケーションである。先に述べたとおり、300GHz帯テラヘルツ波は波長が1mmのため、μmオーダーの微小な動きを検知できる。そのため、体表面の振動から呼吸、脈拍、人の動作など微小な動きを検出するバイタルセンサー、道路やトンネルなどの経年劣化状態を測定するインフラ検査などで活用が期待される。



図1-300GHz帯テラヘルツ波センシング技術の活用が期待されるアプリケーション例

3. テラヘルツ波センシングシステム

テラヘルツ波センシングシステムでは、MIMO(Multiple Input Multiple Output)レーダーの原理を基本に、測定対象空間をビームスキャナし、センシングを行う。MIMOレーダーでは、送信アレーランテナから信号を送信し、測定対象物で反射した信号を受信アレーランテナで受信する。受信信号から、測定空間各部の反射係数を算出することによってセンシングを行う。

テラヘルツ波は距離減衰が大きく、テラヘルツ波センシングシステムは近傍領域(フレネル領域)を観測環境とすることが想定されるため、従来のMIMOレーダーのように反射波を遠方界(平面波)とみなすことができない。そのため、従来のビームフォーミングによる指向性制御では、測定したい空間上の座標(注目点)を特定した上でアンテナ素子との距離に応じて焦点制御を行うため、測定に時間を要する。また、テラヘルツ波を送受信するアレーランテナの製造にはアンテナを高密度に配列するため微細加工が必要になり、製造時の歩留り確保が困難になる。これらの問題を図2に示すようなバーチャルフォーカスセンシング技術及びBox型配置MIMOアンテナによって解決している。

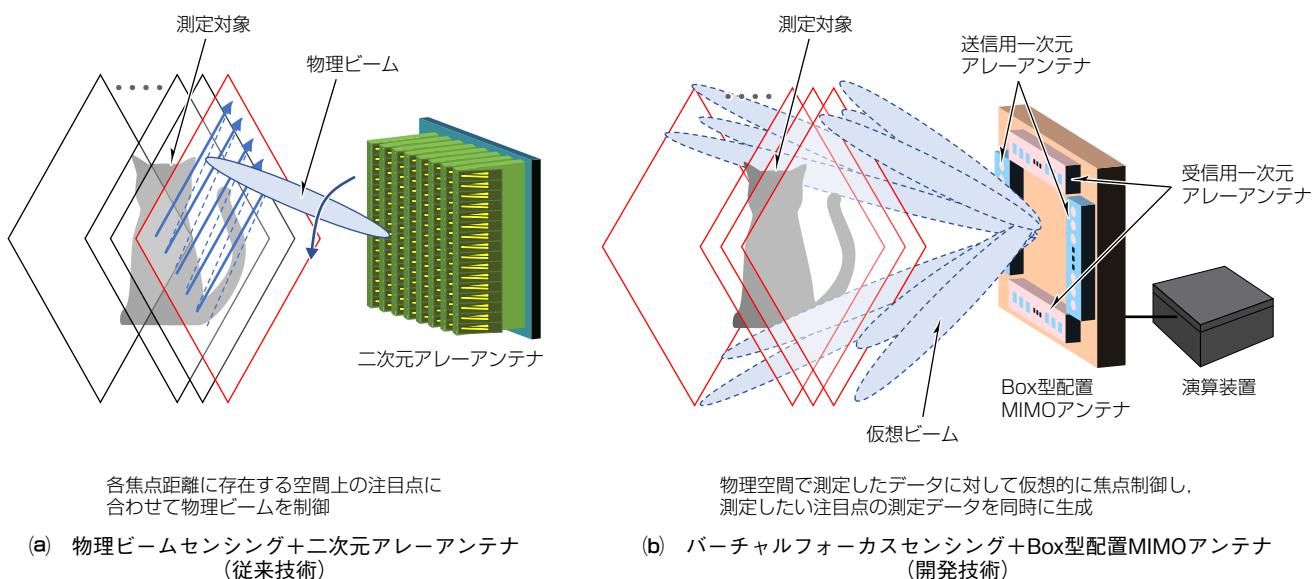


図2-テラヘルツ波センシングシステム

広く普及している二次元アレーインテナレーダーでは、アンテナ素子からの信号位相を調整することによって指向性のある物理ビームを形成し、ビーム方向を変えながら測定対象をセンシングするため、一度に一つの注目点しかセンシングできない。一方、バーチャルフォーカスセンシング技術は指向性制御を行わず反射波を測定し、仮想空間上で複数の注目点に焦点を合わせたバーチャルビームを形成することで、測定したい注目点を同時にセンシングできる。

テラヘルツ波センシングシステムで、製造の歩留り確保可能なMIMO構成としてBox型配置MIMOアンテナ方式を開発している。この方式は、直線状にアンテナ素子を並べた送信用一次元アレーインテナを垂直方向に、同受信用一次元アレーインテナを水平方向に配置し、全ての送信アンテナ素子-受信アンテナ素子の組合せで測定したい注目点との距離を計算し、反射係数を推定し、等価的に二次元アレーインテナを実現する。さらに、送信用一次元アレーインテナ2本と受信用一次元アレーインテナ2本をBox配置にすることによって、アンテナを二次元に高密度配置した場合と等価の開口面積が得られ、高い解像度でのセンシングが実現可能になる。

4. テラヘルツ波デバイス技術

3章に述べたBox型配置MIMOアンテナを実現するため、当社では300GHz帯で動作する一次元アレーインテナを開発している。アレーインテナ実現に必要な要素技術は(1)RFIC(Radio Frequency IC), (2)アンテナパッケージの二つに大別される。この章では当社が持つこれらの技術について述べる。

開発している300GHz帯送信用RFIC及び受信用RFICの構成を図3に示す。今回の開発では、集積性と高出力化の両立が期待できる45nm SOI-CMOS(Silicon On Insulator-Complementary Metal Oxide Semiconductor)プロセスを採用している。

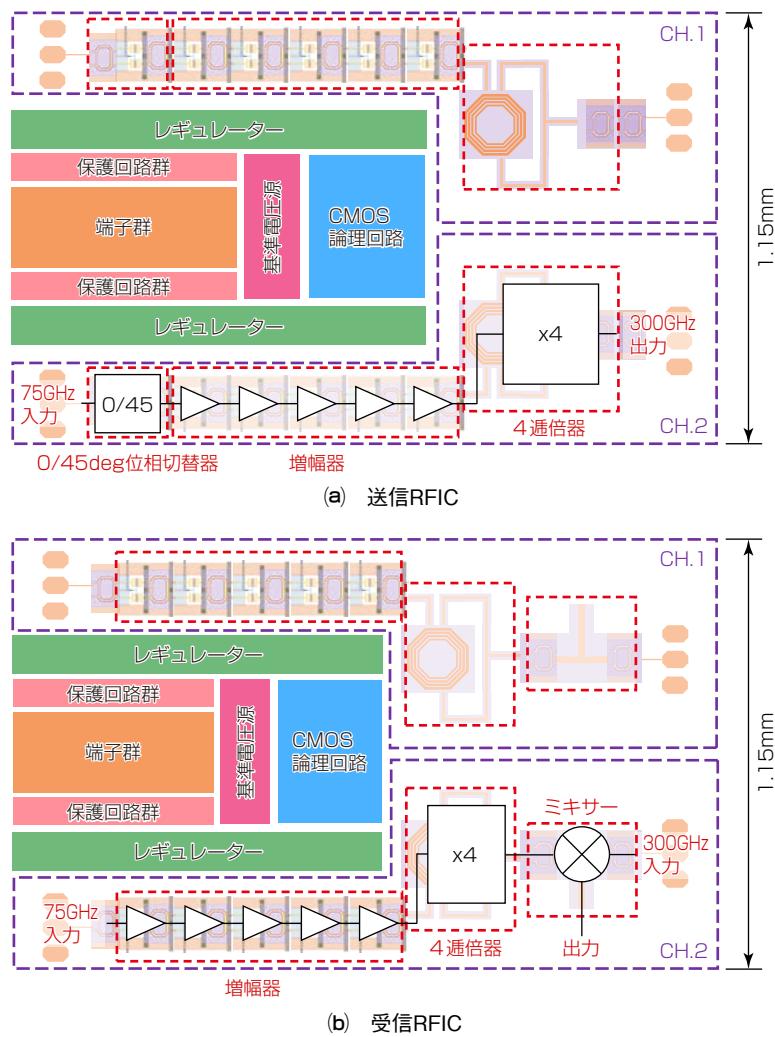


図3-300GHz帯RFIC構成

送受信RFICは1/2波長間隔で並べる必要があり、図3に示すように1.15mm以下に2系統を配置する高密度配置が必要である。従来にない高密度配置のため極力回路数を減らす必要がある。そのため送信RFICは一般的な2倍増幅器を2段重ねる構成でなく、図3(a)に示す0/45deg位相切替器と75GHz帯増幅器及び4倍増幅器を、受信RFICも図3(b)に示すように75GHz帯増幅器と4倍増幅器及び基本波ミキサーという従来とは異なる回路構成によって300GHz帯送受信RFICを構成している。

300GHz帯アンテナパッケージの基本構成、試作図面及びその試作サンプルを図4に示す。この構造は、ICの後工程技術である再配線プロセスを用いた二重パッチアンテナである。構成要素は、IC配線層(基材: SiO₂(二酸化ケイ素))、再配線層、片面のフィルム基板から成る。円形パッチから成るアンテナ励振素子は再配線層最上層に形成した。アンテナへの給電は、IC配線層に形成した整合回路を介して、再配線層からIC配線層を接続する給電ピン(スタックVIA)による背面給電で行う。

一方、無給電素子は片面フィルム基板上に形成し、導電性テープを用いて無給電素子が下向きになるように実装した。実装した結果、図4(b), (c)に示すとおり、アンテナ励振素子のパターン製造誤差1μm以下を実現し、このプロセスで高精度な製造ができることが確認できた。これらのことから、高精度な製造や実装を可能にしながら、二重パッチアンテナを採用したことによる広帯域化が可能になり、所望のアンテナ特性の実現が容易になる。

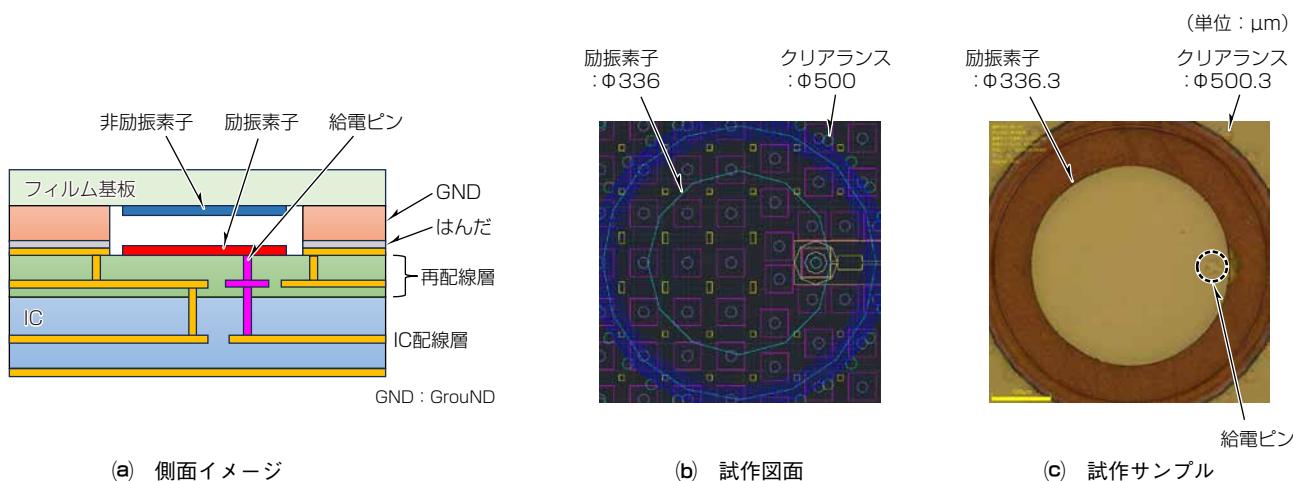


図4-300GHz帯アンテナパッケージの基本構成

5. テラヘルツ波センシング実証実験結果

300GHz帯テラヘルツ波センシングシステムの有効性を確認するため、断層イメージング⁽¹⁾及びバイタルセンシング⁽²⁾の実証実験を実施した。使用した測定系及びその測定結果を図5に示す。3章及び4章に述べた一次元アレーアンテナは現在開発中のため、単一の送信ホーンアンテナと受信ホーンアンテナをXYステッパーに乗せて動かして、静体をセンシングすることによって、二次元アレーアンテナを模擬している。スーツケースの中身に発泡スチロールの板を敷き詰めて、模造ナイフとモデルガンをそれぞれ別々の板に埋め込んで、断層イメージング撮像を行った。この結果、模造ナイフとモデルガンをそれぞれ配置した層でミリメーター精度で対象の輪郭及び表面をイメージングできることを確認した。

次に、動き検出アプリケーションの一例として、人体の心拍情報を取得するバイタルセンシングを実施した。測定イメージ、及び実施結果を図6に示す。断層イメージング撮像とは異なり、今回の検証では動体に対してセンシングするため、レンズを用いて指向性を模擬して実験した。実験した結果、心拍起因で発生したマイクロメーター級の胸部変位を推定でき、医療分野で心拍間隔の推定に用いられる心電図(ECG: Electrocardiogram)に対して誤差0.5%で推定できることを確認した。

これらの検証から、300GHz帯テラヘルツ波の特長を生かして、非破壊検査やインフラ監視などへの活用も期待される。

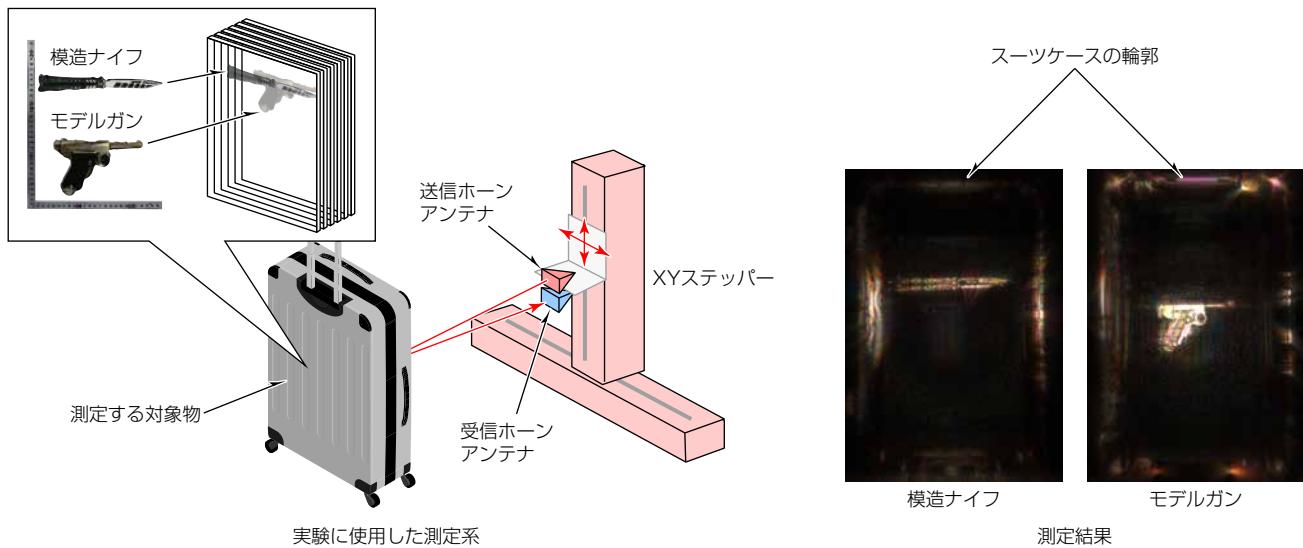
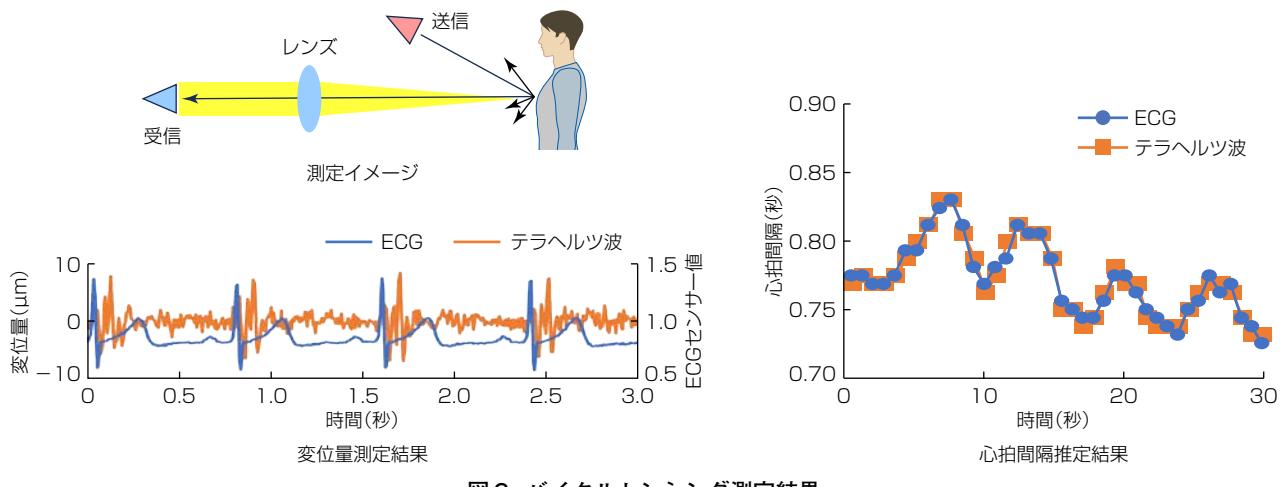


図5-断層イメージング撮像結果



6. むすび

隠れたモノの高解像度センシングを実現する300GHz帯テラヘルツ波センシングシステムの当社技術及び実証実験結果を述べた。300GHz帯テラヘルツ波のコア技術であるバーチャルフォーカスセンシング技術、300GHz帯RFIC及びパッケージング技術によって高分解能と透過性を実現し、セキュリティーゲートやバイタルセンサーなど様々な分野のアプリケーションへの活用を期待できることを示した。

参考文献

- (1) 平 明徳, ほか:300GHz帯サブテラヘルツ波を用いた高解像度イメージング向けセンシング技術, 電子情報通信学会技術研究報告, 123, No.76, RCS2023-77, 288~293 (2023)
- (2) 梅田周作, ほか:300GHz帯サブテラヘルツ波の生体情報測定への応用～遠隔での拍動検知性能評価～, 電子情報通信学会技術研究報告, 123, No.108, RCS2023-100, 109~114 (2023)