



漏れ波に基づく集積型テラヘルツレーダー の実装と非接触心拍計測への応用

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科
門内靖明

1. はじめに

人の心拍は最も基本的なバイタルサインであり、それを非接触に計測するニーズは高い。現在までに、マイクロ波を用いて心拍に伴う胸部の微小変位を非接触で計測する技術が存在している。しかし、その波長はセンチメートルオーダーと長いため、聴診器で得られるような心臓の詳細な動きを反映した情報が得られるわけではなく、反射波の位相変動周期から心拍レートを推定するといった用途に留まっている。ここで、より波長の短いテラヘルツ波を用いると、胸部の詳細な振動を非接触計測できると考えられる。電波と光の中間の波長を持つテラヘルツ波の送受信技術は長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。それをレーダーとして応用すると、電波よりも分解能が高く、光よりも媒質透過性が高い計測が可能になると考えられる¹⁻³⁾。しかし、テラヘルツ帯においてはフェーズシフタおよびサーキュレータの作製に適した低損失材料が未だ存在しないため、ビーム走査および送受信波分離の実装が困難である。そのため、コンパクトなレーダーシステムを構築することは難しい。

そこで、我々はこの課題を解決するために新たなテラヘルツ導波路構造を提案し、フェーズシフタおよびサーキュレータを用いることなくレーダーを構築する手法を考案した(図 1a)。そして、周波数掃引によって得られるデータを処理して対象物の方向・距離・速度を算出できることを実証した⁴⁾。本稿ではその要旨をまとめるとともに、実際に心拍計測に応用した事例について解説する。

2. 漏れ波に基づく集積型テラヘルツレーダー

2-1 提案構造

漏れ波アンテナ (Leaky-wave antenna, LWA) とは、導波路から空中に波動を連続的に漏洩させて指向性ビームを形成するアンテナである。このような LWA は、例えば導波管壁にスリットを設けることで実装することができ、給電周波数を掃引すると導波路内外の空間における位相整合条件に従って指向性を変化させることができる。LWA は従来からマイクロ波帯で用いられてきたものであるが⁵⁾、フェーズシフタを用いずに指向性を可変できることから近年テラヘルツ帯において着目されてきている⁶⁻⁸⁾。

通常、LWA は導波路中に入力された全てのパワーが空中に放射されるように設計される。その際、LWA は導波路入力ポートと空間出力ポートを有する 2 ポート素子とみなされる(図 1b(i))。しかし、このような 2 ポート素子をレーダー用アンテナとして用いる場合、LWA から送信されたレーダー信号の後方散乱成分を同一の LWA で受信すると可逆性により受信波が導波路入力ポートに戻るようになるため、サーキュレータがない限り受信信号を個別に取り出すことはできない。そこで我々は、LWA の放射量を意図的に抑制することで、LWA を対称 4 ポート素子として利用することを着想した(図 1b(ii))。構造の可逆性のみならず対称性を考慮すると、導波路中の残存信号は LWA から送信されるレーダー信号と対称な方向から到来するレーダー信号とコリニア結合される。したがって、導波