

# テラヘルツビームの走査と到来方向推定

Terahertz beam steering and direction of arrival estimation

金井 伸也, 宮本 知幸, 田切 孝夫

Shinya Kanai, Tomoyuki Miyamoto, Takao Tagiri

**要旨** テラヘルツ (THz) 帯の電磁波領域は計測や通信分野への応用が期待されている。特に無線通信等への適用のためには、THzビームの照射方向走査や到来方向推定といった、ビーム追従に関わる要素技術が必要とされる。本論文では、共鳴トンネルダイオード (RTD) をTHz波の発生・検出素子として用いた上述の要素技術の検討内容を報告する。照射方向走査については、反射型アンテナへのオフセット照射により線形な角度走査が可能であることを確認した。到来方向推定については、少ない受信素子からのデータ点に対して、相関係数を用いた推定手法を適用することで、5素子RTD曲面アレイによる推定が可能であることを確認し、方向推定の為のアンテナアレイの設計指針を確立した。

**Summary** Terahertz (THz) band is a region of the electromagnetic wave that is expected to use for specific measurements or communication systems. Particularly for applying to communication systems, beam tracking technique, such as irradiation direction scanning and direction of arrival estimation of terahertz beam, is needed. In this paper, we report our studies of beam tracking technique, as described above, using resonant tunneling diodes (RTDs) for generating and detecting THz wave. As a result, for the irradiation direction scanning, by implementing the offset irradiation to reflector antenna, the capability for the linear directional scanning was confirmed. Whereas, as to the direction of arrival estimation, applying the estimation method using correlation coefficient to a few data points, capability of the estimation by the five (5) -element RTD curved surface array was confirmed. Finally, the guideline for design of the antenna array for estimation of direction was established.

**キーワード:** テラヘルツ波, 共鳴トンネルダイオード, 無線通信, ビーム走査, 到来方向推定

## 1. はじめに

テラヘルツ (THz) 帯域の電磁波は「未開の領域」と呼ばれており、現在、発生・検出デバイスの開発が盛んである。図1に示すように、THz帯域は0.1~10THz付近を指し、電波と光の中間領域であるため、その双方の性質(透過性、直進性)を併せ持つ。また、THz帯域の特徴的な性質として、水分子への大きな吸収率や、物質固有の吸収スペクトル(指紋スペクトル)の存在などが挙げられる。

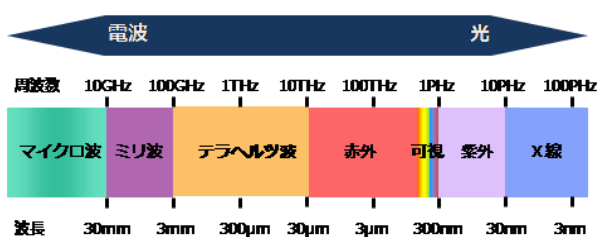


図1 THz帯域

前述の性質を利用し、THz帯域の産業応用が期待されている。我々はこれまで、THz帯域の透過性を利用したイメージングシステムの開発を進めてきた<sup>(1)</sup>。一方、THz帯域は次世代高速無線通信のための帯域として特に注目されており、100Gbps級の大容量無線通信の可能性が検証されている<sup>(2)</sup>。その際、THz波の波長の短さに起因する直進性のために送信方向と受信方向の調整が課題となっている。

この課題を解決するため、我々はTHz帯域におけるビーム追従に関わる要素技術として、送信ビームの走査技術およびビーム到来方向の推定技術の研究を行ってきた。以下にその検討内容を述べる。

## 2. ビーム追従の必要性

直進性の強いTHz帯で図2に示すような固定局-移動体間の通信を想定した場合、固定局が常に移動体の方向を知るためには、移動体側送受信アンテナは無指向性でな

なければならない。しかし、無指向性アンテナはアンテナ利得が低いため、固定局から高利得の狭指向性送信アンテナを用いて移動体方向へ送信しなければならない。このとき移動体方向へTHzビームを走査する技術が必要となる。さらにTHzビーム走査を行う固定局側には、移動体の方向を知るための技術も必要となる。

このように今後期待されるTHz帯での高速無線通信では、①狭指向性THzビームの走査技術、②THzビーム到来方向推定技術等のビーム追従に関する技術が必要と考えられる。本稿ではこれらの技術に関する、我々の取り組みを報告する。

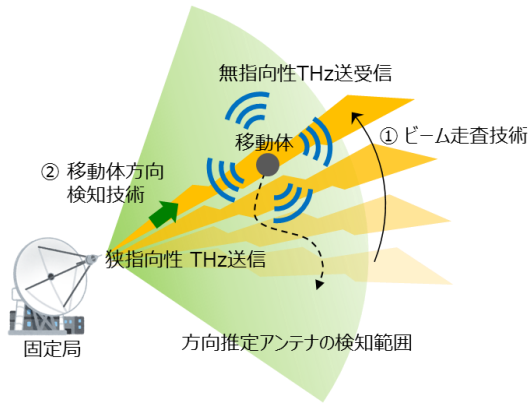


図2 ビーム追従技術

### 3. 共鳴トンネルダイオード

共鳴トンネルダイオード(RTD)とは、量子井戸の共鳴準位を利用した半導体素子であり、図3のように負性微分抵抗(NDR: Negative Differential Resistivity)を有した特徴的な電流-電圧特性を持つ<sup>(3)</sup>。RTDにNDR領域のバイアス電圧をかけることでTHz帯域の自励発振が起こる。また、バイアス電圧をNDR領域手前の非線形領域に設定することで、受信THz波の整流検波が可能となる<sup>(4)</sup>。

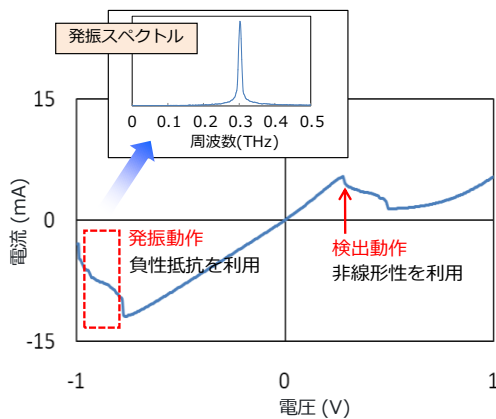


図3 RTDの電流-電圧特性

RTDをアンテナに集積することで、小型のTHz波の発生・検出デバイスとして利用可能となる。現在RTDを用いて1.92THzの室温発振が報告されている<sup>(5)</sup>。

RTDは単体でTHz波の発生・検出が可能であるという利点から、実用的な応用が見込まれている。RTDを用いた無線通信としては、RTDの発振をOn-Off変調することでTHz帯域の無線通信を行い、9Gbpsのエラーフリー伝送に成功した事例がある<sup>(6)</sup>。

本研究では、ローム株式会社様が開発中のRTD素子の開発品を、THz波の発生・検出デバイスとして使用しており、発振周波数は0.3THzである。

全ての実験において、THz波の発生は500kHzの変調信号とDCバイアス電圧を、バイアスティを介して送信側RTDに印可することによって行った。THz波の受信には、受信側RTDから得られる電圧をバイアスティにてバイアス電圧を除いて増幅し、スペクトラムアナライザにてピーク強度を検出した。測定装置の構成を図4に示す。

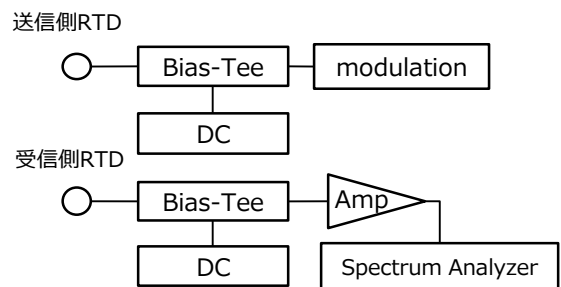


図4 測定装置構成

### 4. 反射型アンテナを用いたテラヘルツビーム走査

RTDを用いた送信側のTHzビーム走査について述べる。送信ビームは高利得アンテナが望ましいため、大きな開口面積の構成が求められる。一般的なビーム走査方式としては、フェイズドアレイ方式が広く利用されている。これはアレイ配置した放射素子の発振位相を制御することで照射方向を走査する方式である。しかし、RTDはアンテナ集積発振素子のため発振位相制御が现阶段では困難であり、大開口のフェイズドアレイ方式は実用的でない。今回我々は実用可能なビーム走査方式として、反射型アンテナへのオフセット照射構成を採用した。

#### 4.1 ビーム走査手法

ビーム走査の原理を図5に示す。反射器に対する発振源の位置を焦点 $F_0$ からビーム軸と垂直に距離 $d$ の位置 $F_d$ へと水平方向へオフセットさせることで、照射角度を $\theta_d$ 変化させる。

本方式の原理検証をするため、単一RTD素子の線形走査による実験を行った。実験では、Si超半球レンズにマウントされたアンテナ集積型RTDモジュールを発振源とした。反射器は4インチ(約10cm)の軸外し放物面鏡を用いた。軸外しを用いた理由は、RTDモジュールによるブロッキングの影響を低減するためである。ブロッキングとはビーム経路上に存在する遮蔽物が引き起こす現象で、強度の低下や指向性の乱れの原因となる。

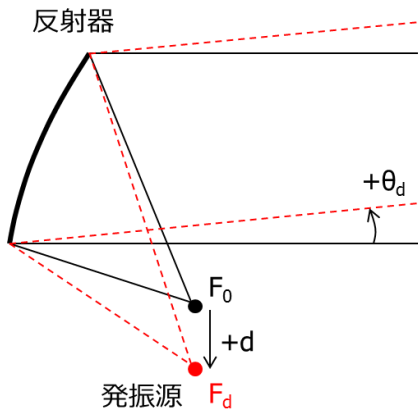


図5 ビーム走査原理

RTDモジュールのオフセット位置走査はステッピングモーター式自動ステージを用いて行った。実験系の概観写真を図6に示す。

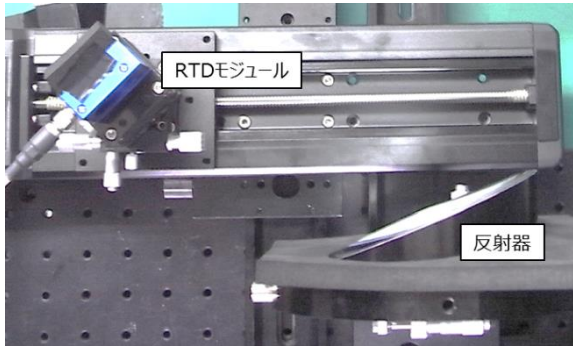


図6 ビーム走査系外観写真

構築した実験系の各オフセット位置において照射ビームの指向性測定を行うことで、ビーム走査に伴う指向性の変化を取得する。指向性測定系の構成を図7に示す。基準アンテナとなる受信側は、被測定アンテナである送信側と同様Si超半球レンズ上へとマウントされたRTDモジュールを受信動作させ、4インチ径の反射器の焦点位置に設置することで構築した。基準アンテナと測定アンテナ間の距離は十分遠方と見なせるよう300mmとし、両アンテナの軸を一致させた状態から、送信アンテナの反射面を中心に相対角度 $\theta$ を変化させながら受信強度を取得した。

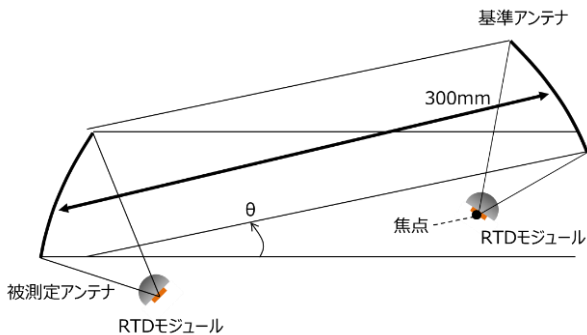


図7 指向性測定系

4.2 評価結果

構築した実験系のオフセット距離0mmにおける送信指向性を図8に示す。測定結果から3dBビーム幅は約0.75°と見積もられた。

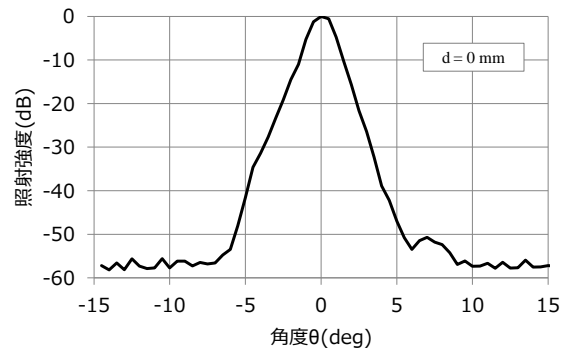


図8 送信ビーム指向性

続いてオフセット距離を変化させることでビーム走査を行い、ピーク強度とその時の角度について測定を行った。

図9に測定結果を示す。オフセット距離に追従して照射角度が線形に変化しており、この手法によりビーム走査が可能であることが示された。一方、オフセット距離が大きくなるにつれビーム強度が弱まってしまい、-60mm~+30mmの範囲を超えると照射強度が最大値に比べて-10dBまで減少する。これはTHz波の照射領域が反射器から外れてしまうことに起因している。そのため、仮に-10dB以上を利用可能な強度範囲だとすると、今回構築した系の角度走査範囲は-20° ~+10° の範囲に制限されてしまう。角度走査範囲拡大のためには、所望の範囲に応じた反射器の設計が必要である。

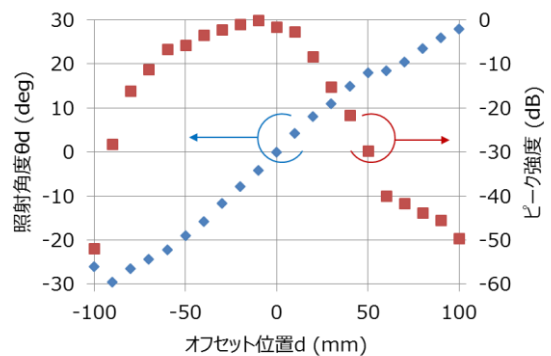


図9 ビーム走査結果

角度走査範囲内の任意の方向に存在する端末へとビームを向けるためには、照射強度が十分に均一とみなせる程度に走査ステップを細かく取る必要がある。3dBビーム幅が0.75°であることを考えると、図9の傾きから、送信素子の照射位置を2.0mm間隔で切り替えることによって、3dBの範囲内で均一にビーム走査を実現できることが分かる<sup>7)</sup>。

5. テラヘルツビーム到来方向推定

次に、RTDを用いたTHzビームの到来方向の推定について述べる。電磁波の送受信には対称性があるため、前述の反射アンテナ方式の受信器と送信器を交換することで、到来方向のスキャンが可能である<sup>(8)</sup>。ただし、測定範囲を隙間なくスキャンするためには多くのデータ点が必要なため、スキャンに時間を要する事から推定速度に限界がある。速度向上のためには受信器をアレイ化することが望ましい。しかし、アレイ化によって受信器面積が広がることでブロッキングの影響が顕著となってしまふ。レンズを用いた透過型の構成も考えられるが、十分な測定範囲を得るためには大型のレンズが必要となり、実用性が低い。また、RTD受信器とレンズとの間の干渉によって、受信器の指向性が乱れてしまうことも確認されている<sup>(9)</sup>。

上記課題解決のため、我々は離散的に配置された、異なる方向に指向性をもつ受信器群からの信号の強度比から、到来角度を推定する手法を採用した<sup>(10)</sup>。

5.1 推定手法

それぞれが異なる方向に指向性を持つ受信器をn個配置する。ここで、i番目の受信器の到来角度θに対する受信感度を $y_{i, \theta}$ と表す。上記受信器アレイに未知の方向からTHz波が到来し、i番目の素子から強度 $x_i$ の受信信号が検出されたとする。アレイの各素子が、全てのθについて受信感度比が一意に決まるような指向性を持つならば、得られた受信信号比から到来角度を推定することが可能である。

今回は単純のため、以下の式で示す各素子の受信信号比と受信感度比の線形相関係数 $R(\theta)$ を計算し、その最大となる角度θを推定結果とした。

$$R(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_{i, \theta} - \bar{y}_\theta)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{i, \theta} - \bar{y}_\theta)^2}}$$

ここで、 $\bar{x}$ は入射信号に対する各素子の受信強度の平均、 $\bar{y}_\theta$ はθ方向からの信号に対する各素子の受信感度の平均である。

5.2 精度評価方法

到来方向推定能力を定量的に評価するため、推定精度を以下のように定義する。

$$accuracy = 2\sigma,$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\theta_{Est, i} - \theta_{Set})^2}{N - 1}$$

ここで、Nは測定回数、 $\theta_{Est, i}$ はi番目の到来方向推定結果、 $\theta_{Set}$ は到来方向の設定値である。標準偏差の2倍をとることで、正規分布を持つ測定揺らぎに対して、65%程度の確からしさとなる。

以降では、任意のSNR設定値になるように、測定した指向性データに、白色雑音を付加した信号を入力として、N=501個のデータを生成して推定精度の評価を行った。

5.3 指向性設計

受信器アレイを設計するにあたって、最適な推定精度を得るための指向性について計算上での検討を行った。

計算モデルとして、ガウス関数型の単峰的な受信指向性を仮定する。受信器が多峰的な指向性を持つと、受信強度比から到来方向を一意に推定できなくなり、推定精度が悪化してしまうからである。

受信アレイ素子数は5素子とし、各素子の指向性は同一形状のものを10° 間隔でピーク角度をずらして配置する。こうすることで図10のように30° (-15° ~+15°)の推定範囲内で必ず複数素子の受信強度情報が得られるため、ビーム走査で得られた範囲へと適用が可能となる。

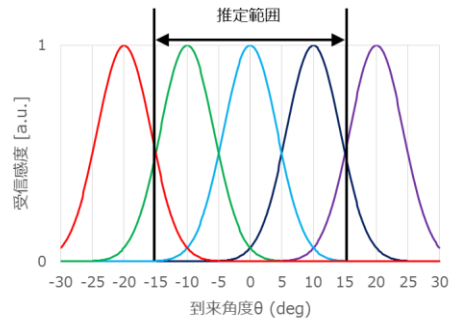


図10 アレイ素子の指向性

以上の条件において、推定精度が最適となるように指向性半値幅の設計を行った。推定精度は受信信号の信号対雑音比(SNR)に依存するため、指向性半値幅とSNRの2つのパラメーターに対して、推定範囲±15° 以内の推定精度を評価した。結果を図11に示す。

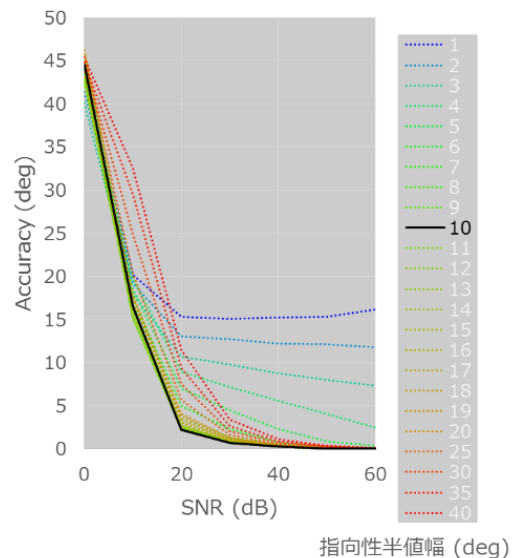


図11 推定精度の指向性半値幅とSNR依存性

図11から、どの半値幅においてもSNRの良化に伴って精度が急激に向上し、やがて一定値へと漸近する傾向が確認された。半値幅が $10^\circ$ に満たない場合には、SNRが良くても推定精度が上がらず、 $10^\circ$ を越える場合には、低SNRでの推定精度が徐々に悪化していく結果になった。実測上のSNRは環境によって大きく変動するため、全体に亘って良い推定精度が得られることが望ましい。低SNRと高SNRの全ての範囲において良好な推定精度が得られるのは半値幅 $10^\circ$ の場合であり、今回設定した各素子の指向性ピークの間隔と同じ値である。これはすなわち各素子の指向性がちょうど最大値の半分になる角度で隣り合う素子と交わる設計とすることで、最適な推定精度を得られると解釈することができる。

5.4 試作と評価

前節の計算を実験的に検証するため、RTDを用いた受信器アレイを試作し、評価を行った。

受信器アレイの各素子はRTD素子とそれに結合した角錐ホーンアンテナで構成される。各ホーンアンテナは指向性半値幅が $10^\circ$ となるようにE面とH面の開口寸法とホーン長さをそれぞれ5.55mm, 6.82mm, 15.12mmとした。

各受信素子をH面上に水平に並べ、隣り合う素子と $10^\circ$ の角度をつけてそれぞれの開口端を一致させることで、 $10^\circ$ の指向性ピーク間隔を持った曲面配置したホーンアンテナアレイモジュールを構築する。図12に作製した曲面アレイモジュールの外観写真を示す。ホーンアンテナは3Dプリントした樹脂に金をめっきすることで作製した。

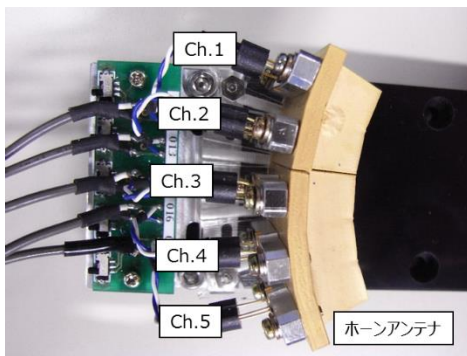


図12 曲面アレイモジュール

図13に、それぞれの受信素子の指向性測定結果を示す。測定は図7と同様の系を用いて、送受信素子を入れ替えることで受信指向性の取得をした。各素子とも概ね単峰的な指向性を持つことが確認された。結果から指向性半値幅を読み取ると $6^\circ \sim 8^\circ$ となっており、設計値の $10^\circ$ よりも低い値となった。これは3Dプリンタの加工精度やRTD素子とホーンアンテナのマッチング方法に原因があると考えられる。

この指向性結果から、作製した曲面アレイ素子の推定精度を評価した。まず、図14にSNRを20dBとしたときの推

定精度の角度依存性を示す。比較のため、半値幅 $6^\circ$ の理想ガウス型指向性での結果を共に表す。 $\pm 5^\circ$ や $\pm 15^\circ$ といった指向性の重なりが大きいところで推定精度が良くなり、 $\pm 20^\circ$ 以上の範囲では急激に精度が劣化するという計算値の傾向が実験結果においても再現されている。

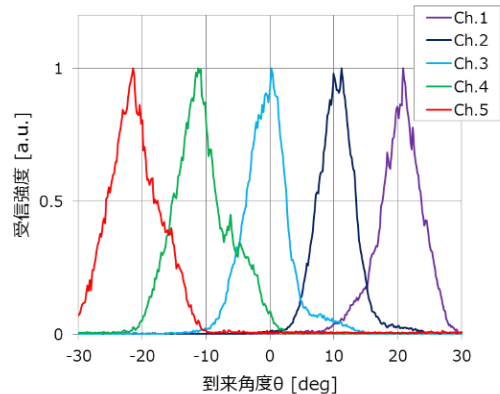


図13 曲面アレイモジュール受信指向性

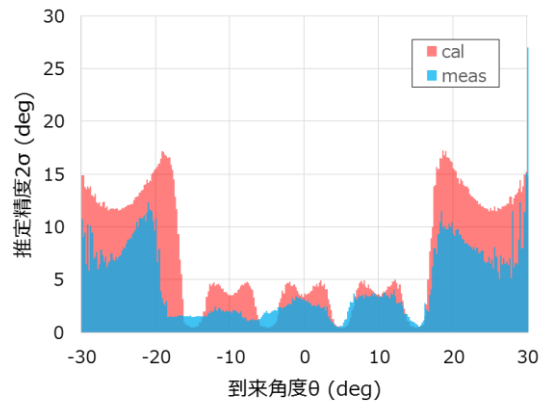


図14 推定精度角度依存性

次に、推定範囲 $\pm 15^\circ$ における推定精度の最大値を、SNR依存性として図15に示す。比較として半値幅 $6^\circ$ のガウス型指向性の計算結果を比較として用いた。計算結果と同様の、SNRの良化に伴った推定精度の向上の様子が確認された。

5.5 考察

実験結果から、アンテナアレイの指向性と角度推定精度の関係について、計算結果の妥当性が実験によって示された。この結果を踏まえて、本手法を用いた任意の性能を持つ推定アンテナの設計について考察する。

推定精度の高精度化には、隣接する受信素子間の受信角度を小さくする必要がある。一方、推定範囲を拡大するためには、逆に偏向間隔を広げる必要がある。この2つはトレードオフの関係であり、どちらか一方の性能条件を決定することで、もう一方の性能も決定される。受信素子数を増やすことで両方の特性を同時に改善することができ

るが、その際は素子駆動のための消費電力の増加を許容しなくてはならない。

また、その他の設計パラメーターについてもトレードオフの関係があることが確認されている。今回はパラメーターとして推定範囲、推定精度、素子数、指向性半値幅、SNRを考慮した。これらのうちどのパラメーターを固定とするかは任意であり、残りの可変パラメーターの最適化によってシステム全体の性能が決定される。

以上のように、本手法を用いることで、THzビーム追従システムにおいて要求される到来方向推定精度を、必要最低限の素子数で得るためのアンテナアレイの設計指針を得ることができた。

今回行った検討は原理検証であり、実使用上発生し得る複雑な問題については今後の課題となる。例えば、複数の入射THz波が存在する場合の分離方法や、通信経路上に存在する物質による干渉の影響除去などが挙げられる。また、より高精度な推定を目指すためには、角度推定のアルゴリズムの改善が有効だと考えられる。

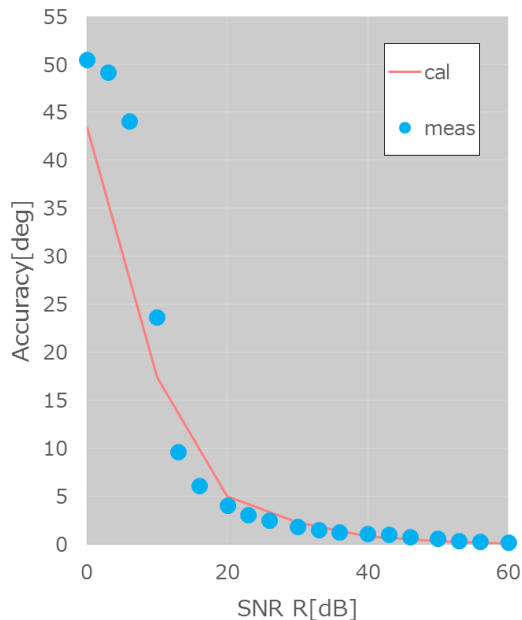


図15 推定精度SNR依存性

## 6. まとめ

共鳴トンネルダイオードを用いたTHzビーム追従に関する要素技術についての研究成果を報告した。

我々は、RTDを用いて、次世代THz波無線通信においてビーム追従を行う際に必要となる要素技術について検討を実施した。送信ビームについては、反射型アンテナへのオフセット照射によってオフセット量に対して線形な角度走査を実現することができた。ビーム到来方向推定については、5素子のRTDを曲面配置したアレイからのデータに相関関数を用いた推定手法を適用する事で方向推定を実現し、ビーム到来方向の推定のための受信アンテナアレイの有用な設計指針を確立することができた。

THz波通信分野は現在も活発に研究開発が進められており、具体的なアプリケーションはこれから検討されていく。本研究内容を実用化に向けて進展させるためにも、今後の動向には目が離せない。

## 7. 謝辞

本研究を行うにあたり、開発中の共鳴トンネルダイオード素子を提供していただいたローム株式会社様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) 山口淳：“テラヘルツイメージングシステムの開発”，PIONEER R&D (2014)
- (2) <https://www.nict.go.jp/press/2016/02/01-1.html>
- (3) 浅田雅洋：“共鳴トンネルダイオード”，応用物理83, 565 (2014)
- (4) T. Miyamoto, A. Yamaguchi, and T. Mukai: “Terahertz imaging system with resonant tunneling diodes”, Japanese Journal of Applied Physics, Volume 55, Number 3 (2016)
- (5) T. Maekawa, H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada: “Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss”, Applied Physics Express, Volume 9, Number 2 (2016)
- (6) S. Diebold, K. Nishio, Y. Nishida, J.-Y. Kim, K. Tsuruda, T. Mukai, M. Fujita and T. Nagatsuma, : “High-speed error-free wireless data transmission using a terahertz resonant tunnelling diode transmitter and receiver”, Electron. Lett. Vol. 52, No. 24, pp1999-2001 (2016)
- (7) 金井伸也, 向井俊和: “軸外シパラボラアンテナを用いた共鳴トンネルダイオードによるテラヘルツビーム走査”, 電子情報通信学会2015年ソサイエティ大会 C-14-13 (2015)
- (8) 金井伸也, 向井俊和: “軸外シパラボラアンテナを用いた共鳴トンネルダイオードによるテラヘルツビーム到来角度推定”, 電子情報通信学会2016年総合大会 C-14-16 (2016)
- (9) 金井伸也, 向井俊和: “共鳴トンネルダイオードアレイを用いたテラヘルツビーム到来角度推定”, 電子情報通信学会2016年ソサイエティ大会 C-14-17 (2016)
- (10) 金井伸也, 向井俊和: “曲面配置共鳴トンネルダイオードアレイを用いたテラヘルツビーム到来角度推定”, 電子情報通信学会2017年総合大会 C-14-4 (2017)

## 著者紹介

**金井 伸也**(かない しんや)

研究開発部 第2研究部 研究1課に所属。  
テラヘルツ計測技術の研究に従事。

**宮本 知幸**(みやもと ともゆき)

研究開発部 第2研究部 研究1課に所属。  
テラヘルツ計測技術の研究に従事。

**田切 孝夫**(たぎり たかお)

研究開発部 第2研究部 研究1課に所属。  
高密度光ディスク, 超多層光ディスクの研究開発を経て, 現在テラヘルツ計測技術の研究に従事。