テラヘルツ波センシング・イメージング技術と応用

大 谷 知 行 ^{a,b}

^a (国研) 理化学研究所 光量子工学研究センター (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 519-1399)

^b 東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻 (〒 980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3)

Sensing and Imaging Technology and Applications of Terahertz wave

Chiko OTANI ^{a,b}

^a RIKEN Center for Advanced Photonics, RIKEN (519-1399 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-0845)

^b Department of Physics, Graduate School of Science, Tohoku University (6-3 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8578)

Keywords : Terahertz wave, Millimeter wave, Sensing, Imaging, Beyond 5G/6G

1. はじめに

100 ギガヘルツ (GHz) – 10 テラヘルツ (THz) の周波数領域の電磁波は、テラヘルツ波またはテラヘルツ光と呼ばれ、電波と光の境界領域に位置する。1 THz は、1,000 GHz (10^{12} Hz) であり、波数では 33 cm^{-1} 、波長では $300\text{ }\mu\text{m}$ に相当する。この帯域は、低周波領域はミリ波 (30–300 GHz)、高周波領域はサブミリ波 (300 GHz–3 THz) や遠赤外線とオーバーラップしており、古くから様々な基礎研究や利用可能性の開拓が進められてきている。加えて、この帯域の広いバンド幅の超高速無線通信利用 (いわゆる「Beyond 5G/6G」、以下、B5G/6G と略す) に向けた環境整備、技術開発、そして、政府機関の予算投資が盛んに行われている^{1)–5)}。具体的には、2030 年頃から 300 GHz 付近の周波数の実利用が開始されるという共通認識が世界的に共有されている。

この動きは非常に重要であるため、もう少し掘り下げて述べておく。通常、新技術の利用は、シーズとニーズ、そして、コストと利益とが折り合って初めて広がるため、本当に社会で広く活用されるかどうか自明ではない。実際、筆者も様々な場所で、「本当に B5G/6G は使われるのか? (使われないで終わるんじゃないか?)」と尋ねられる。5G の普及もままならぬ状態で、5G 超の技術が広がるか疑問ではないか、と。しかし、この推測は当てはまらないと考えるべきである。無線通信では、国際電気通信連合・無線通信部門 (ITU-R) が主催する世界無線通信会議 (World Radiocommunication Conference, WRC) で何年も前からロードマップが敷かれ、各国政府・企業・研究機関等を巻き込んで世界共通規格や周波数割当の準備が進められる⁶⁾。このため、国内で B5G/6G 技術が使われようが使われまいが、世界は着々と前へ進んでいく。やらなければ取り残されるだけである。B5G/6G の潮流で最も留意すべき点である。また、5G 関連特許件数は中国がダントツに多かったため⁷⁾、B5G/6G では、このような後追いの状況を繰り返さないぞ、という強い危機意識も根底にある。各国

の競争は今後ますます熾烈になると見られる。

2 つめの重要ポイントは、B5G/6G の潮流が単一技術の進展として捉えられているのではなく、コロナ後の社会構造の変革とも密接に関わっているという視点である。実際、NTT docomo や NICT のホワイトペーパーでは、社会課題の解決や新しい働き方などを実現する重要なツールの一つとして B5G/6G 技術が組み込まれており^{1),5)}、社会全体の変容を見据えて技術を捉えることも重要である。なお、筆者の個人的な意見であるが、この無線通信技術の活用シーンのいくつかは、2015 年にアメリカ DARPA が公表した戦場における通信技術の使われ方を商用化・実社会化したものとも見なせる⁸⁾。こちらの資料もぜひ併せて参照して頂きたい。

もうひとつさらに重要なポイントは、無線通信で使われる末端の端末通信デバイスは間違いなく半導体となるという点で、2030 年・300 GHz に向けデバイスが劇的に小さく安くなっていくと捉えておくべきだろう。実際、研究レベルではすでに数 mm 角程度の CMOS 送受信機が実現しており、携帯端末に搭載できるだけのデバイスが実証されている⁹⁾。後述するセンシング・イメージング応用においてもこれまでネックであったコストの問題を解決できる環境が整いつつある。

2. テラヘルツ波の基本的な性質

テラヘルツ波は液体の水に強く吸収されるほか、大気中の水蒸気にもいくらか吸収される。このため、無線通信やセンシングで大気中を伝搬させる時にもある程度影響を受けるため、まずその性質を見ておく。図 1 にテラヘルツ帯の大気による減衰率を示す¹⁰⁾。縦軸が dB/km で表されていることに注意されたい。これは、大気中を 1 km 進んだ時に何 dB 減衰するかを示しており、200–300 GHz 帯に減衰の少ない領域が存在することがわかる。この帯域では概ね 3 dB/km 程度以下であり、1 km 進んでも信号は半分程度にしか減衰せず、長距離にわたって信号を飛ばすことができる。無線通信で利用が想定されるのはこのような低減衰の周波数帯であり、し

図1 100–1,000 GHzにおける大気による吸収¹⁰⁾

しばしば「大気の窓」とも呼ばれる。高周波になると所々に水分子などの吸収バンドが存在するだけでなくベースラインも上昇するため、長距離の信号伝達は一般的に難しい。一方、近距離を伝搬させる場合は状況が異なる。例えば、1 mあたりの減衰は図1の縦軸を1/1,000にすると得られるため、最も減衰の大きい557 GHzや752 GHzのピーク頂点の位置でも減衰率は約10 dB/m (=10,000 dB/km)、つまり、1 mで高々1/10程度に減衰するだけである。この程度であれば、検出器の感度が良好であれば十分に利用可能である。このように、テラヘルツ波の利用では、使用帯域の伝搬距離と大気吸収をまず考慮する必要がある。特に、センシング・イメージング応用を想定した場合、伝搬距離はたいいてい1 mのオーダー以下になるため、減衰の大きい特定の周波数にさえ注意しておけば、過剰に神経質になる必要はない。

次に、センシング・イメージングの利用に関連するテラヘルツ波の性質を述べる。テラヘルツ波は、プラスチック、セラミックなどの多くのソフトマテリアルを透過するため、非破壊・非接触でこれらの製品内部を透視できる(図2)¹¹⁾。透過しやすいかしくいかは、主として、対象物が極性を有するかどうかによる。極性が小さければ、テラヘルツ波の入射により電気双極子モーメントが生じにくいから、吸収・再放射が小さくなり透過性が高くなる。テラヘルツ波は、多くのソフトマテリアルに対して高い透過性を有する電波領域の中で最も短い波長領域に位置する。このため、適度な解像度(mmからサブmm程度)のイメージング検査が可能である。

図2 JRのSUICAカードのテラヘルツ透視画像¹¹⁾。使用光源は後進波管(BWO)連続波光源、周波数600 GHz、空間分解能は約0.5 mmである。

一方、透過率は高周波ほど下がる。また、光源強度も周波数が高いほど下がる傾向にあり、現行の連続波光源の典型的な放射強度は、100 GHzで100 mW、300 GHzで1–10 mW、600 GHzで100 μ W程度である¹²⁾。

これらの性質のため、低周波領域は比較的厚みのあるサイズの大きなものを見るのに適し、高周波領域は比較的薄いものや小さいものを精細に見るのに適している。測定空間分解能(つまり、測定波長)を1ピクセルのサイズとした場合に何ピクセルまで測定するのが適切かということとも関わっており、典型的には100–1,000ピクセル四方程度のサイズがちょうど適したイメージ領域と考えられる。例えば、300 GHz(波長1 mm)を用いた場合には、測定対象物の典型的な大きさは10 cm–1 m四方くらいの大きさと想定できるだろう。

このように、テラヘルツ波の利用においては、測定対象物の透過性と解像度の両方を考慮した最適周波数が存在するため、計測システムでどの周波数を用いるかは非常に重要なポイントの一つである。典型的には、透過性と空間分解能のバランスから、イメージングに適する周波数領域は概ね100–700 GHzである。この周波数がB5G/6Gの帯域とオーバーラップすることは、将来的に安価なデバイスを活用できるという意味で非常に重要である。

3. テラヘルツ波によるセンシング・イメージング

上記の状況を踏まえて、本章では、センシング・イメージングのツールとしてのテラヘルツ波の特長や応用可能性を振り返った上で、今後予想される展開について述べる。テラヘルツセンシング・イメージングの具体的な応用例はすでに多数提案・報告されており膨大な量になるため、参考文献として文献13を挙げておくが、その中でも直近のタイムスケールで最も重要な利用法は非破壊検査であろう。たとえば、ミリ波に掛かる低周波領域では、タイルや建築材料などの比較的大きな構造物が測定対象として有望である。一方、測定対象の厚みが薄くて透過性が高く、かつ、空間分解能が求められる場合には、やや高めの周波数を使ったほうが良い。図3に醤油・ソース等の液体を入れるプラスチック小袋のシール部分のマイクロホールを測定した際の欠陥検知例¹³⁾、図4にコーティング下の錆の検知例¹⁴⁾を示す。

図3 プラスチック液体小袋のシール部のマイクロホールの欠陥検知結果。測定周波数は600 GHz、光源はBWO連続波光源、小袋の走査速度は0.8 m/sec、水の通ったマイクロホールの直径は100 μ mである¹⁴⁾。マイクロホール部では、水による吸収と穴がレンズのような働きをすることから、透過信号の強度の減衰や変化が見られる。

3次元のイメージングの場合、位相情報をうまく活用することで奥行き方向の空間分解能は波長よりも十分に小さい値まで計測可能である。典型的には、波長の数%程度の分解能を出すことが可能である。特に、テラヘルツ計測は非金属のコーティングに対する親和性が非常に高い。よく用いられるのは、テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)の超短パルス(パルス幅 ~ 1 ps)を用いた薄膜等の断層イメージングである。図4は電力伝送用の鉄塔の防食塗装膜下の錆の検出例である¹⁵⁾。コーティング材料と金属酸化物の透過特性の違いや界面の存在によって錆の部分がいかに分離されているのかわかる。このほか、自動車の車体のコーティング厚み分布、製菓分野における錠剤のコーティング厚みムラの検出など $10\text{ }\mu\text{m}$ オーダーの薄膜の厚みを検知可能である^{16)~19)}。また、短パルスの界面反射による断層イメージングだけでなく、テラヘルツ光干渉断層イメージング(THz-OCT)を用いたイメージングでも μm オーダーの優れた断層イメージングが可能である²⁰⁾。また、奥行き方向のイメージングについては、周波数変調連続波レーダー(FMCW)方式や合成開口レーダー

(SAR)の活用もなされている^{21),22)}。

4. プラスチック材料のテラヘルツ分光

テラヘルツ帯は分子間相互作用や生体分子などの大きな分子の骨格振動の振動周波数に相当するため、特に1 THzを超える帯域のテラヘルツ分光によって赤外分光とは異なる緩やかな相互作用のセンシングが可能である。これらの振動は、分子のサイズが大きいため計算で導くことは容易ではないが、物質ごとに異なるスペクトルの特徴を現象論的に活用した物質種の同定・弁別も可能である。また、吸収スペクトルの計算も進みつつあり、吸収ピークの同定、特に、水素結合による吸収構造の同定も行われている^{23),24)}。また、テラヘルツ波は極性が高い液体である水にはよく吸収され、水分を含む物質のセンシングには制限がある一方で、ごく微量の水のセンシングに高い感度を有する。図5はプラスチックフィルムに吸着したわずかな水分が検知可能であることを示している²⁵⁾。なお、吸収は水が氷になると劇的に減少するため、その特性を活用したセンシングも可能である^{26),27)}。

5. テラヘルツシステムのコンポーネント

すでに述べたように、B5G/6Gの流れが進むにつれて、半導体を用いた小さく安価な光源や検出器などの主要コンポーネントが実際の計測に用いられるようになると期待される。しかし、実際のシステムは光源と検出器だけで構成されるわけではない。図6は我々がプロトタイプ機の研究開発を進めている300 GHz帯ウォークスルーポティスキャナーの実際の光学系の写真である。このシステムでは、FMCWレーダー方式を用いた3次元イメージングを行うが、それを実現するために、レンズ、ミラー、ビームスプリッターといった光学コンポーネントを組み合わせて使用している。この時に注意すべき点は迷光の存在である。このシステムでは、光源強度とヘテロダイン検出の比(実効的な信号対雑音比(S/N比)に相当)が110 dB(11桁)に及ぶため、光源からの光が想定とは異なる方向から入射すると、それが測定精度を劣化させてしまう可能性がある。そこで重要となるのがシステム内部の

図4 電力伝送用の鉄塔の防食塗装膜下の錆の検出¹⁵⁾

図5 乾燥なし(左)と乾燥済(右)のナイロンフィルムの温度ごとの吸収(上段)と温度変化率(下段)。乾燥なしのサンプルで50–100℃の温度域でフィルム表面に吸着した水による吸収変化が見られる²⁵⁾。

図6 開発中のテラヘルツワークスルーボディスキャナーの光学系。送受信機、レンズ、ミラー、ビームスプリッターといった光学コンポーネントに加えて、不要な反射を防ぐための吸収体の活用も必須である。

壁面に設置している吸収体である。

このような吸収体は、壁面に当たった迷光をできるだけ反射・散乱しないことが求められる。最も一般的に用いられるのは、ここでも使用している Eccosorb[®] で、最も高周波に対応したものでも反射率はおおよそ-30 dB 程度(正反射成分の実測値)であり、上記の S/N 比からわかるように、より低反射率の吸収体への要望は依然として強い。また、レンズなどの光学材料においても、無反射コーティングが施されることが本来は望ましい。微細加工技術を用いて表面付近の反射を低減させる技術もあるが、製作コストまで勘案すると、コーティングが活躍できる場はまだまだあると思われる。ただし、単純なコーティングの場合には波長程度の厚みが必要となるため、コストパフォーマンスの高い無反射コーティングを実現するには、可視光領域のような薄い無反射コーティングとは異なる発想も必要になると思われる。

6. おわりに

以上、本稿では、テラヘルツセンシング・イメージングの観点から、近未来の B5G/6G の動向を見据えて、表面技術に多少なりとも関わると考えられる応用例を中心に概観した。一方、筆者は無線通信の専門家ではなく、本稿では B5G/6G の本丸である無線通信のデバイスに求められる誘電体薄膜については触れられなかった。しかし、これが極めて重要であることは言うまでもない。実際、高周波になればなるほど、ほんのわずかの誘電体損失や設計値のずれが伝搬信号の著しい減衰・損失を生み、通信の不具合を発生させる要因となると考えられる。高周波領域において実用的なシステムで要求される精度は、恐らくはこれまでとは比較にならない高精度のものであり、周波数の上昇に伴って近い将来に大きな壁となって立ちのぼるだろう。その意味で、良質な誘電体材料の開発、そして、その適切な評価は極めて重要である。その評価には、上記のようなセンシング・イメージング技術の高度化も不可欠であり、デバイスの活用のみならず、通信とセンシングが両輪となって相互に技術を高めていくことが今後求められると考えている。

(Received July 13, 2021)

文 献

- 1) NTT docomo ホワイトペーパー「5Gの高度化と6G(3.0版)」(2021).
- 2) Softbank ニュース Web site, 5Gの先の未来へ, Beyond 5G/6Gに向けたテラヘルツ波への挑戦(2020). https://www.softbank.jp/sbnews/entry/20200618_02
- 3) 総務省 Beyond 5G推進戦略懇談会 Web site, https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/Beyond-5G/index.html
- 4) NEDO ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業 Web site, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100172.html
- 5) 情報通信研究機構 Beyond 5G/6G ホワイトペーパー(2021).
- 6) 大谷知行, 寶迫 巖; 科学技術に関する調査プロジェクト2016報告書-冷戦後の科学技術政策の変容, p. 121 (国会図書館, 2017).
- 7) 経済産業省 通商白書2019(2019).
- 8) T. Woodward; 100 Gb/s RF Backbone (100G), web site, <http://www.darpa.mil/program/100-gb-s-rf-backbone>
- 9) S. Lee, R. Dong, T. Yoshida, S. Amakawa, S. Hara, A. Kasamatsu, J. Sato, M. Fujishima; *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)* (2019). <https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/49768>
- 10) 情報通信研究機構, テラヘルツ波大気減衰率提供サービス, <https://smiles-p6.nict.go.jp/thz/jp/decay.html>
- 11) A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, K. Kawase; *Applied Optics*, **43**, 5634 (2004).
- 12) K. Sengupta, T. Nagatsuma, D. M. Mittleman; *Nature Electronics*, **1**, 622 (2018).
- 13) 深澤亮一; 分析・センシングのためのテラヘルツ波技術(日刊工業新聞社, 2013).
- 14) Y. Morita, A. Dobroiu, C. Otani, K. Kawase; *J. Food Protection*, **68**, 833 (2005).
- 15) 布施則一, 高橋招大, 福地哲生, 水野麻弥, 福永 香; 電力中央研究所報告, 研究報告:H11002 (2011).
- 16) T. Yasui, T. Yasuda, K. Sawanaka, T. Araki; *Appl. Opt.*, **44**, 6849 (2005).
- 17) K. Su, Y.-C. Shen, J. A. Zeitler; *IEEE Trans. TeraHz. Sci. Tech.*, **4**, 432 (2014).
- 18) J. A. Zeitler, P. F. Taday, D. A. Newnham, M. Pepper, K. C. Gordon, T. Rades; *J. Pharm. Pharmacol.*, **59**, 209 (2007).
- 19) Y.-C. Shen, P. F. Taday; *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **14**, 407 (2008).
- 20) T. Nagatsuma, H. Nishii, T. Ikeo; *Photon. Res.*, **2**, B64 (2014).
- 21) K. B. Cooper, R. J. Thomas, N. Llombart, B. Thomas, G. Chattopadhyay, P. H. Siegel; *IEEE Trans. TeraHz. Sci. Tech.*, **1**, 169 (2011).
- 22) S. Palm, R. Sommer, A. Hommes, N. Pohl, U. Stilla; *Int'l Arch. Photogram. Rem. Sens. Spat. Info. Sci.*, **XLI-B1**, 81 (2016).
- 23) S. Yamamoto, Y. Mirisawa, H. Sato, H. Hoshina, Y. Ozaki; *J. Phys. Chem. B*, **117**, 2180 (2013).
- 24) H. Hoshina, S. Ishii, S. Yamamoto, Y. Morisawa, H. Sato, T. Uchiyama, Y. Ozaki, C. Otani; *IEEE Trans. THz Sci. Tech.*, **3**, 248 (2013).
- 25) H. Suzuki, S. Ishii, C. Otani, H. Hoshina; *Euro. Polymer J.*, **67**, 284 (2015).
- 26) 水野麻弥, 栗原庸輔, 大谷知行, 進藤賢治, 小川雄一, 松木英敏, 川瀬晃道; 電気学会論文誌E, **125-E**, 229 (2005).
- 27) H. Hoshina, A. Hayashi, N. Miyoshi, F. Miyamaru, C. Otani; *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 123901 (2009).