テラヘルツ波無線通信の研究開発動向

Survey of Researches and Developments on Terahertz Wireless Communications

笠松章史 Akifumi Kasamatsu[†] 竇迫 巖 Iwao Hosako[†]

Summary

大容量のデータを無線通信により簡単にやり取りしたいという要求の高まりを受けて、従来のマイクロ波やミリ波に続く新たな周波数帯としてテラヘルツ波を用いた無線通信の期待が高まっている。テラヘルツ波の特徴としては、従来にない広い周波数帯域幅を用いることができる可能性が挙げられる。テラヘルツ波を発生する手法としてはフォトニクス技術の応用が先行していたが、近年、電子デバイスによる 300GHz 帯の研究開発が総務省のプロジェクト等により活発化し、InP（インジウムリン）系等の化合物半導体デバイス開発、シリコン CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 集積回路による RF フロントエンド、300GHz 帯対応の進行波管増幅器の開発等が実施されている。これと並行して、国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) における周波数割当の検討や、IEEE802 での世界初の 300GHz 帯無線通信規格の策定も行われている。本稿では、これらの動向について紹介する。

Key Words

テラヘルツ、無線通信、電子デバイス、標準化

1 はじめに

無線通信における伝送速度の進展は著しく、100 Gbit/s が既に視野に入っている。図 1 は有線及び無線通信のデータ通信速度の発展トレンドを示している。イーサネット規格等の有線通信、無線 LAN に代表されるノマディック無線通信、及び携帯電話・スマートフォン等のモバイル無線通信の全てにおいて、伝送速度は年々指数関数的に増加しており、特に無線通信の伝送速度の伸び率は大きく、有線通信に迫る勢いを見せている。このようなトレンドの背景には、大容量のデータを無線通信によって簡単にやり取りしたいという要求の高まりがある。無線通信において図 1 の赤い星印付近に示す 100 Gbit/s 級の高い伝送速度を実現する手段の一つとして、100GHz 超のミリ波 (MMW) 及びテラヘルツ (THz) 帯の電磁波（ここでは 0.1~3 THz 程度を考える、以下「テラヘルツ波」という）の利用が期待されている。テラヘルツ波無線の応用としては、図 2 に示すような近接データダウンロード（キオスクモデル、タッチダウンロード）、半導体チップ間通信、ボード（プリント基板）間通信、きょう体

間通信（データセンターのサーバ間通信等）、4K/8K 等の高精細映像伝送、モバイルネットワーク内通信などが想定されている^{(2), (3)}。本稿では、300 GHz 程度の周波数における技術開発の動向を中心に、テラヘルツ波無線通信の特徴と、その研究開発動向について述べる。

2 テラヘルツ波無線通信の特徴

テラヘルツ波を無線通信に用いる利点として最も大きいのは、従来技術より広い周波数帯域幅を利用できる可能性が高いことである。「広帯域」には二つの側面が考えられるが、その一つは、大気吸収特性（図 3）を見たときに、吸収の大きい周波数のピークの間に、ある程度吸収の小さい「大気の窓」(Atmospheric window) があり、この帯域を有効に活用すれば数十~100 GHz 近くの周波数帯域幅を一括して通信に利用できる可能性があることである。もう一つは、国際的な周波数割当の法令において 275 GHz 以上は確定的な周波数分配がされておらず (unallocated)、今後の調整次第で広い帯域が無線通信で利用できる可能性があることである。シャノン・ハートレーの理論では通信路容量は帯域幅に比例することから、広帯域が利用可能であれば、その分高速の通信を実現することができる。また、周波数が高い方が広い周波数帯域幅に対して「比帯域」は小さくなり、部品技術等で広帯域への

[†] 国立研究開発法人情報通信研究機構，小金井市
National Institute of Information and
Communications Technology, Koganei-shi, 184-
8795 Japan

図1 情報伝送速度の進展

(T. Kürner, “IEEE 802.15-13-0130-01-0thz Launching”⁽¹⁾ から引用・加筆)

図2 テラヘルツ波無線の応用例

図3 電磁波の大気吸収特性と周波数割当の状況
(AMATERASU⁽⁴⁾ 提供の大気減衰値を基に作成)

対応がしやすくなる面もある。例えば、同じ 30GHz 幅の周波数帯を扱うとしても、60GHz 帯では比帯域が 50% に達するのに対し、300GHz では 10% にすぎない。

前述の大気の窓といえども、マイクロ波帯に比べると大気減衰は大きい。しかし、無線通信において近年注目されている 60 GHz 帯は酸素による吸収が大きく 12dB/km 程度であるが、それに比べれば 70~450 GHz 程度までの大気の窓は減衰が少なく、300GHz で 3.7dB/km である。また、フリスの伝達公式では受信電力が周波数の二乗に反比例することから、高い周波数の電磁波は「伝搬損が大きい」と単純に考えられがちであるが、同公式では受信電力が送信と受信のアンテナ利得に比例することから、アンテナ利得は周波数の二乗に比例することから、アンテナ実効面積が同じであれば周波数が高い方が伝搬損は減少する。よって、一般的によく言われるテラヘルツ波のように高い周波数の電

波は「伝搬損が大きい」というのは一概には言えず、「アンテナと帯域の選択によっては遠くまで飛ばすことができる」というのが正しい理解である。例えば、300GHz において送信電力 10dBm、受信電力 -30dBm で伝送可能な送受信機を用い、送受とも同じ利得のアンテナを用いるとした場合、必要なアンテナ利得は通信距離 100m で約 42dBi (理想的な円形開口半径で約 20mm、以下同様)、通信距離 1km で約 53dBi (約 71mm) である。同様の条件で通信距離 100m の場合、60GHz で必要なアンテナは約 35dBi (約 45mm)、30GHz では約 31dBi (約 57mm) であり、周波数が高いほどアンテナが小形になることが分かる。

前述のアンテナ利得の議論からも分かるとおり、テラヘルツ波はマイクロ波やミリ波に比べ指向性が強いと言える。これは利点とも考えられるし、取扱いに注意を要する点でもある。指向性が高いと、送受信機間での軸合せや放射方向のスキャン機構を要

する可能性があるが、他の通信システムへの空間的な干渉が小さくなり、送受信機の配置や多重方式において空間分離を活用できる利点があるとも言える。テラヘルツ波は性質が光に近付き、見通し外への回込みの性質は弱くなるため、見通し外への通信は困難となることにも注意を要する。また、集積回路や実装基板上でのテラヘルツ波の伝送については、伝送損や寄生容量、寄生抵抗等の影響については、正確なモデルが確立しておらず、集積回路チップから実装基板を経てアンテナへのテラヘルツ信号の引き回しや接続方法等について解決に向けて研究開発を要する。

以上をまとめると、従来のマイクロ波等で一般的な電波を広く放射し、システム間の共存は周波数を狭帯域に分割して実現する考え方に対し、テラヘルツ波では、見通し間で広帯域を用いた高速通信を空間的に分離して行うという考え方が有効である。また、テラヘルツ波が飛ばないという考えは必ずしも正しくなく、アンテナも含めたシステム設計によって様々な通信距離に対応できる可能性がある。

3 テラヘルツ波無線通信の研究開発

テラヘルツ波による無線伝送特性の検証は、電子デバイスに先行してフォトミクシング技術によってけん引されてきた。フォトミクシング技術では、ある周波数の差を持つ二つの光信号を混合してフォトダイオードに入力すると、光信号の周波数差に相当する周波数の電気信号が出力されることを利用する。データ信号による変調は光信号の段階で行われるため、高速の光変調器が利用可能である。ここで、光信号からテラヘルツ信号を得るためのキーデバイスは単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD: Uni-Traveling Carrier Photo-Diode)である。UTC-PDは高速応答と高出力が特徴で、テラヘルツ帯の高速信号にも追従可能である。UTC-PDを用いた伝送実験系により、2009年には250GHzで8Gbit/sの伝送について発表された⁽⁵⁾。その後、240GHzで100 Gbit/s⁽⁶⁾、300GHz帯で48 Gbit/s⁽⁷⁾の伝送速度が実現されている。更に、最近では1THzでの無線通信についても報告されている⁽⁸⁾。

電子デバイスでのテラヘルツ波通信の取組みは、まず高周波特性で優れる化合物半導体デバイスによって進められた。日本では、2011~2015年に実施された総務省電波資源拡大のための研究開発「超高周波搬送波による数十ギガビット無線伝送技術の研究開発」⁽⁹⁾によって、世界に先駆けて能動電子デ

バイス(トランジスタ)を利用したテラヘルツ波無線通信技術の研究開発が本格的に開始された。半導体電子デバイスに用いる物質には様々な種類があるが、その中で一般的に高い周波数で最も優れた特性を持つのはInP(インジウムりん)を基本物質として利用したデバイスである。この研究開発では、InP系半導体を用いた高電子移動度トランジスタ(HEMT: High Electron Mobility Transistor)の動作速度や雑音性能を改善して300 GHz帯での動作を可能とするとともに、これを集積して増幅器や変調器の半導体集積回路チップを作製する技術、更に集積回路チップやアンテナその他の部品を組み合わせモジュールとして一体化する技術など、テラヘルツ波を用いた無線通信を実現するための要素技術が開発された。

2.で述べたように、テラヘルツ波を無線通信に用いる利点の一つとして、まだ割当が決定されていない周波数帯において、一括して広い帯域幅を用いられる可能性があることが挙げられるが、この研究開発では、変調方式としては単純な2値振幅変調(ASK: Amplitude Shift Keying)を用いながら20GHz以上の広い周波数帯域幅を用いることで、20 Gbit/s級の伝送速度を達成可能な送信機及び受信機が開発された⁽¹⁰⁾。特に、受信モジュールはアンテナを含め体積およそ1cm³程度と非常に小形である。また、送信機に用いられた増幅器の最大出力電力は約10mWである。これら要素技術の有用性を実証するため、図4のようなタッチダウンロードの実機実験⁽¹¹⁾が実施された。300GHz帯送信モジュールを組み込んだ情報キオスク端末、及びスマートフォンサイズのきょう体に300GHz帯受信モジュールを組み込んだ受信端末が作製され、これらを用いて物理速度20Gbit/s、誤り訂正処理も含めた実データ伝送速度として16Gbit/sを超える高速ダウンロードが実証された。

海外における化合物半導体電子デバイスを用いた研究プロジェクトとしては、ドイツ連邦教育研究省のTERAPAN(2013~2016年)⁽¹²⁾において、Fraunhofer研究機構の固体物理研究所(IAF)が中心となり、InAs系化合物半導体MMIC技術により、屋内で10 mを100 Gbit/sで伝送することを目標とした研究開発が実施された。最近の欧州連合の研究・イノベーション枠組み計画であるHorizon2020のTerapod(2017-2020)⁽¹³⁾では、IEEE802.15.3dのユースケースであるデータセンタ内無線通信の実現可能性を示すことを目的としている。

図4 タッチダウンロードの実機実験

総務省電波資源拡大のための研究開発では、前述の研究開発を拡充して2014年度から「テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発」として、シリコンCMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 集積回路を用いた300GHz帯フロントエンドの研究開発が実施されている⁽¹⁴⁾、⁽¹⁵⁾。シリコンCMOS集積回路は、コンピュータや電気製品の演算や記憶を行う部品として、世の中で最も一般的に用いられている半導体デバイスであるが、動作速度はInP等の化合物半導体による電子デバイスよりは劣っており、一般にシリコンCMOS技術で作製した増幅器で増幅できる信号周波数はおよそ250GHz程度までである。したがって、シリコンCMOS集積回路を用いた300GHz無線送受信機開発では、一般的な無線装置で行われているように、送信機の最終段や受信機の初段で無線信号を増幅することができないため、信号の増幅は100～150GHzより低い周波数で行い、それをアンテナに一番近い部分で300GHzに変換する方式を用いている。従来の一般的な変換回路では変換特性のひずみにより信号の線形性が損なわれてしまうが、この研究では信号の線形性を保ったまま周波数を変換する独自の回路が提案され、前述の2値ASKより一度に多くの情報を送ることが可能な多値直交振幅変調 (QAM: Quadrature Amplitude Modulation) を用いることが可能となり、100Gbit/sを超える伝送速度が達成されている。シリコンCMOSは、デジタル演算回路等で培われた高い集積化が可能であるため、複雑な変調回路や処理の並列化が得意であり、図5の集積回路写真でうかがえるように、それらの特徴が生かされている。図5の集積回路は、基準線幅40nmのシリコンCMOSプロセスで製造さ

図5 300GHz シリコン CMOS 送信集積回路
(文献(15)の発表資料から)

れており、50GHz程度の搬送波(LO)と105Gbit/s相当の多値変調データ信号を含んだ中間周波数(IF)信号を入力することにより、内部で信号処理が行われ300GHzの無線周波数(RF)信号が出力されるものである。

これまで述べたようなトランジスタを用いた技術に対して、ダイオードを用いた技術では更に高い周波数を扱えるものがある。電子デバイスで最も高い周波数を扱える技術として、共鳴トンネルダイオード(RTD: Resonant Tunneling Diode)を用いたものが挙げられる。RTDを用いた発振器では1.92THzという高い周波数での発振が実現されている⁽¹⁶⁾。更に、RTDを用いた500GHz帯の無線送受信によって伝送速度34Gbit/sが達成されている⁽¹⁷⁾。海外では欧州HORIZON2020のiBrowプロジェクト(2015-2017)⁽¹⁸⁾で、英国グラスゴー大学が中

図6 TWTAの構成

心となりノキアほか11機関が参画し、RTDを用いた極近距離を数十Gbit/sで通信するシステムの研究開発が実施された。

半導体電子デバイスを用いた増幅器や送受信回路では、出力電力はシリコンCMOSで数百 μ W、InPで10mW程度である。出力電力を更に高めるために、前述の総務省「テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発」の一環として、真空管の一種である進行波管を用いた増幅器(TWTA: Traveling-Wave Tube Amplifier)を300GHzで実現するための研究開発が実施された^{(19), (20)}。TWTAは図6に示すような構成で、遅波回路と呼ばれる真空に保たれた導波管構造の中を伝搬する高周波信号を、電子線との相互作用によって増幅させるものであり、従来からマイクロ波やミリ波では宇宙用途や大電力用途等の電力増幅器として利用されている。これを300GHz帯に適用するためには、波長が短くなることに伴って遅波回路を微小かつ高精度に作製する必要があり、MEMS(Micro Electro-Mechanical System)技術を用いて加工するなどの工夫が施された。これによって、1W級の増幅器の実現が目指されている。世界的に見ると、TWTAによって220GHz帯で11W⁽²¹⁾、1THz帯で29mW⁽²²⁾等の報告がある。

そのほか、ドイツ研究振興協会(DFG)のPriority Program SPP 1655/0 – Wireless Ultra High Rate Communication for Mobile Internet Access “Wireless 100 Gb/s and beyond”(2012-2018)⁽²³⁾では、内部に11の子プロジェクトがあり、要素技術からシステム研究まで幅広く探求している。また、2018年度から研究が開始される情報通信研究機構の日欧協同公募⁽²⁴⁾では、「ミリ波やサブミリ波の周波数帯における無線のバックホール／フロントホールのリンク」が研究開発課題とし

て挙げられている。

4 標準化の動向

国際電気通信連合無線通信部門(ITU-R: International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector)では3~4年に一度、世界無線通信会議(WRC: World Radiocommunication Conference)を開催し、無線通信規則(RR: Radio Regulations)の改正等を議論している。RRでは周波数範囲ごとに利用が許される業務種別の割当が規定されているが、275GHz以上の周波数については正式な割当である「分配」(allocation)はまだ決まっておらず、275~1,000GHzの範囲での電波天文やリモートセンシングといった受動業務において利用されている周波数の「特定」(identification)が脚注の中で記述されているのみである⁽²⁵⁾。「特定」とは、いわゆる周波数の正式な割当である「分配」とは異なり、まだ未割当ではあるが事前的に利用している旨の表明の位置付けである。2015年のWRC-15におけるRRの改正に向けた議論の結果、次回2019年に開催予定のWRC-19の議題のうち、議題番号1.15で「決議767(WRC-15)に従って、275~450GHzで運用する陸上移動業務応用と固定業務応用を使用する主管庁のために周波数帯を特定する検討を行う」こととなった⁽²⁶⁾。現在、WRC-19に向けて、ITU-Rで詳細検討を担当する組織であるWorking Partyのうちの幾つかにおいて、テラヘルツ無線の業務応用に関する様々なユースケースと想定される技術要件^{(27), (28)}、及び無線信号の伝搬モデル⁽²⁹⁾の検討等が行われている。

また、無線通信の相互接続仕様が大きな影響力を持つIEEE802委員会(LAN/MAN Standard Committee)では、300GHz帯を用いた100Gbit/s級ポイント間無線通信の標準規格を検討するタスクグループIEEE802.15.3dが2014年5月に設立され、252~325GHzを用いる無線通信システムのPHY層とMAC層の標準規格が策定され、2017年10月にIEEE Std 802.15.3dとしてリリースされた⁽³⁰⁾。この規格では、ユースケースとしてキオスクダウンロード、チップ間・ボード間通信、データセンター内無線通信、モバイルフロントホール・バックホールが想定されている。

5 まとめ

大容量のデータを無線通信により簡単にやり取りしたいという要求の高まりを受けて、従来のマイクロ波やミリ波に続く新たな周波数帯としてテラヘルツ波を用いた無線通信の期待が高まっている。本稿では、テラヘルツ波による無線通信の特徴を述べるとともに、それを実現するための研究開発及び標準化活動についての動向を紹介した。テラヘルツ波を発生する技術ではフォトリソの応用が先行していたが、近年、電子デバイスによる 300GHz 帯の研究開発が総務省のプロジェクト等により活発化し、InP 系等の化合物半導体デバイスによる開発に始まり、シリコン CMOS 集積回路による RF フロントエンドや、300GHz 帯に対応した進行波管増幅器の開発も実施されていることを述べた。技術的な研究開発と並行して、ITU-R における周波数割当の検討や、IEEE802 での世界初の 300GHz 帯無線通信規格の策定も進んでいることを示した。

テラヘルツ波の特徴としては従来にない広い帯域を用いることができる可能性が挙げられるが、同時に伝搬損やアンテナ利得など様々な要件のトレードオフがあり、従来利用してきた周波数帯の常識にとらわれずに、新たな発想や利活用を検討することが重要である。

謝辞 「テラヘルツ波無線通信の研究開発」の章で紹介した情報通信研究機構の成果の一部は、総務省電波資源拡大のための研究開発「テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発」によるものであり、情報通信研究機構と共同で受託している各機関（日本電信電話株式会社、富士通株式会社、国立大学法人広島大学、パナソニック株式会社、NEC ネットワーク・センサ株式会社）による成果が含まれている。

図及びイラストの作成において、情報通信研究機構の原 紳介氏、菅野敦史氏に御協力頂いたことに感謝致します。

文献

- (1) T. Kürner, "IEEE 802.15-13-0130-01-0thz Launching," <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/13/15-13-0130-01-0thz-launching-a-study-group-on-thz.pdf>
- (2) Report ITU-R SM.2352, "Technology trends of active services in the band above 275 GHz," June 2015.
- (3) IEEE 802.15 Doc Number 14/0304r16, "TG3d Applications Requirements Document (ARD)," IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks, May 2015.
- (4) AMATERASU, <https://smiles-p6.nict.go.jp/thz/jp/decay.html>
- (5) H.J. Song, K. Ajito, A. Hirata, A. Wakatsuki, Y. Muramoto, T. Furuta, N. Kukutsu, T. Nagatsuma, and Y. Kado, "8 Gbps wireless data transmission at 250 GHz band," *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 22, pp.1121-1122, Oct. 2009.
- (6) S. Koenig, D. Lopez-Diaz, J. Antes, F. Boes, R. Henneberger, A. Leuther, A. Tessmann, R. Shimogrow, D. Hillerkuss, R. Palmer, T. Zwick, C. Koos, W. Freude, O. Ambacher, J. Leuthold, and I. Kallfass, "Wireless sub-THz communication system with high data rate," *Nature Photonics*, vol. 7, pp. 977-981, Oct. 2013.
- (7) T. Nagatsuma, S. Horiguchi, Y. Minamide, Y. Yoshimizu, S. Hisatake, S. Kuwano, N. Yoshimoto, J. Terada, and H. Takahashi, "Terahertz wireless communications based on photonics technologies," *Opt. Express*, vol. 21, no.20, pp.23736-23747, Sept. 2013.
- (8) A. Kanno, "Advanced photonics technology for 1-THz wireless communication," 2017 CLEO-PR, OECC and PGC, Aug. 2017.
- (9) 総務省, "電波資源拡大のための研究開発の実施," <http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/>
- (10) H. Song, T. Kosugi, H. Hamada, T. Tajima, A. El Moutaouaki, M. Yaita, K. Kawano, T. Takahashi, Y. Nakasha, N. Hara, K. Fujii, I. Watanabe, and A. Kasamatsu, "Demonstration of 20-Gbit/s wireless data transmission at 300 GHz for KIOSK instant data downloading applications with InP MMICs," *Int. Microwave Symp., WEIF2*, May. 2016.
- (11) 総務省, 「電波資源拡大のための研究開発」第9回成果発表会, http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000202.html
- (12) <https://www.terapan.de/>
- (13) <http://terapod-project.eu/>
- (14) K. Katayama, K. Takano, S. Amakawa, S. Hara, A. Kasamatsu, K. Mizuno, K. Takahashi, T. Yoshida, and M. Fujishima, "A 300 GHz CMOS transmitter with 32-QAM 17.5 Gb/s/ch capability over six channels," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 12, pp. 3037-3048, Dec. 2016.
- (15) K. Takano, S. Amakawa, K. Katayama, S. Hara, R. Dong, A. Kasamatsu, I. Hosako, K. Mizuno, K. Takahashi, T. Yoshida, and M. Fujishima, "A 105Gb/s 300GHz CMOS transmitter," *Int. Solid-State Circuits Conf.*, pp. 308-309, Feb. 2017.
- (16) T. Maekawa, H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada, "Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss," *Appl. Phys. Express*, vol. 9, no. 2, 204101, Jan. 2016.
- (17) N. Oshima, K. Hashimoto, S. Suzuki, and M. Asada, "Wireless data transmission of 34 Gbit/s at a 500-GHz range using resonant-tunneling-diode terahertz oscillator," *Electron. Lett.*, vol. 52, no. 22, pp. 1897-1898, Oct. 2016.
- (18) <http://ibrow-prD.oject.eu/>
- (19) N. Masuda, "Development activity of 0.1/0.3 THz power module," *Energy Material*

- Nanotechnology (EMN) Meeting on Terahertz 2017, Honolulu, April 2017.
- (20) 増田則夫, 吉田 満, 岡本耕治, 関根徳彦, 菅野敦史, 寶迫 巖, “テラヘルツ波電力モジュール,” MWE2017 ダイジェスト, TH3A-3, Nov. 2017.
- (21) A. Baig, D. Gamzina, T. Kimura, J. Atkinson, C. Domier, B. Popovic, L. Himes, R. Barchfeld, M. Field, and N. C. Luhmann, “Performance of a nano-CNC machined 220-GHz traveling wave tube amplifier,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 64, no. 5, pp. 2390-2397, May 2017.
- (22) J. C. Tucek, M. A. Basten, D. A. Gallagher, and K. E. Kreischer, “Operation of a compact 1.03 THz power amplifier,” 17 th International Vacuum Electronics Conference, April 2016.
- (23) <http://www.wireless100gb.de/>
- (24) <https://www.nict.go.jp/press/2017/10/31-1.html>
- (25) Radio Regulations, Footnote 5.565 (<https://www.itu.int/pub/R-REG-RR/en> 等から入手可)
- (26) Resolution 767 (WRC-15), “Studies towards an identification for use by administrations for land-mobile and fixed services applications operating in the frequency range 275-450 GHz,” Jan. 2015.
- (27) Report ITU-R F.2416-0, “Technical and operational characteristics and applications of the point-to-point fixed service applications operating in the frequency band 275-450 GHz,” Nov. 2017.
- (28) Report ITU-R M.2417-0, “Technical and operational characteristics of land-mobile service applications in the frequency range 275-450 GHz,” Nov. 2017.
- (29) Recommendation ITU-R P.1238-9, “Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300

MHz to 100 GHz,” June 2017.

- (30) IEEE Std 802.15.3d-2017 (Amendment to IEEE Std 802.15.3-2016 as amended by IEEE Std 802.15.3e-2017) “IEEE Standard for high data rate wireless multi-media networks amendment 2: 100 Gb/s wireless switched point-to-point physical layer,” Oct. 2017. <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.3d-2017.html>

(平成 30 年 5 月 8 日受付, 7 月 30 日再受付)

笠松章史 (正員)

NICT 未来 ICT 研究所フロンティア創造総合研究室上席研究員. 博士(工学). 1997 上智大大学院博士課程了. 同年, 上智大理工・電気電子・助手. 1999 富士通研入社. 2002 独立行政法人通信総合研究所(現 NICT)入所. ミリ波・テラヘルツ波を用いた無線通信技術, 及びそれに用いる送受信機と極微細半導体デバイスの研究開発に従事. 応用物理学会会員.

寶迫 巖 (正員)

NICT 未来 ICT 研究所長, テラヘルツ研究センター長(兼務). 博士(理学). 1993 東大大学院理学系研究科相関理化学専攻博士課程了. 同年日本鋼管株式会社(現 JFE)入社. 1995 郵政省通信総合研究所(現 NICT) COE 特別研究員, 1996 入所. 以来, テラヘルツ帯半導体デバイス・各種応用システムの研究開発に従事. 2014-05 ~ 2017-10 100Gbit/s 級無線の標準化を行う IEEE802.15.3d 副議長. 第 10 回産学官連携功労者表彰総務大臣賞(2011). 日本物理学会・応用物理学会・日本赤外線学会・IEEE 各会員.