

## 3-2 テラヘルツ無線通信基盤技術

### 3-2 Terahertz Wireless Communication Technologies

笠松章史 原 紳介 董 鋭冰 渡邊一世 小川博世 寶迫 巖

KASAMATSU Akifumi, HARA Shinsuke, DONG Ruibing, WATANABE Issei, OGAWA Hiroyo, and HOSAKO Iwao

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 300 GHz 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、NICT を含んだ研究開発チームによって、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) における周波数特定の検討や、IEEE802 での世界初の 300 GHz 帯無線通信規格の策定も行われている。

Due to the growing demand that people would like to transfer large-capacity data easily by wireless system, there is an increasing expectation of radio communication using terahertz waves as a new frequency band following the conventional microwave and millimeter wave. Terahertz wave has the possibility of using a wide range of frequency bandwidth that has never been previously used. At first, photonics technologies have been preceded as a technique for generating terahertz waves. In recent years, R&Ds of 300 GHz band by electronic devices have been activated by projects of Ministry of Internal Affairs and Communications Japan, and the development of RF front-end made by compound semiconductor devices and silicon complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) integrated circuit has been carried out by some R&D teams including NICT. In parallel, the standardization in the International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R) and IEEE802 has also been established.

#### 1 まえがき

近年の無線通信における伝送速度の進展は著しく、既に 100 Gb/s (毎秒 100 ギガビット) が視野に入ってきている。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り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 の星印付近に示す 100 Gb/s 級の高い伝送速度を実現する手段の一つとして、100 GHz 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、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」は、いわゆる「電波」や「光」を総称した「電磁波」の中で、1 THz を中心とした周波数帯の電磁波である。具体的な周波数の範囲についての定義には様々あるが、テラヘルツ波を無線通信に用いる電

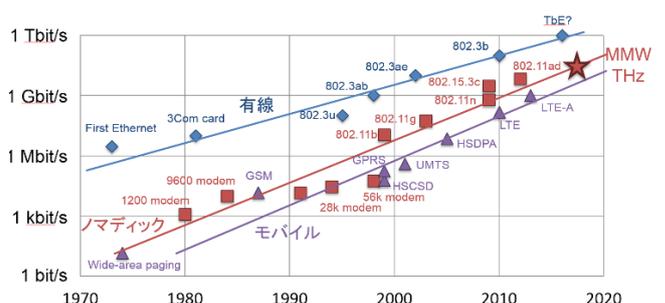


図 1 情報伝送速度の進展 ([1] より引用・加筆)

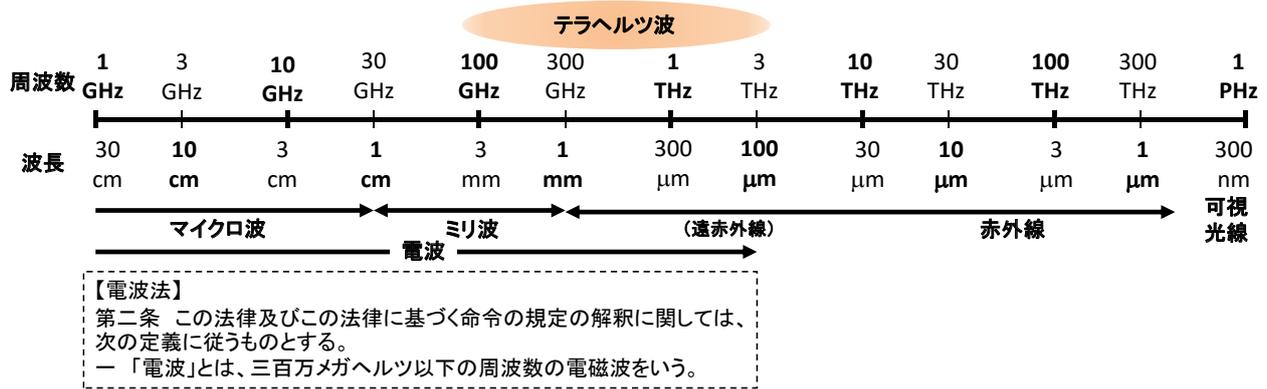


図2 テラヘルツ波と周波数の対応

磁波として考えたときの定義としては、1 THz の 1/10 の周波数である 100 GHz から、電波法の対象となる周波数の上限である 3 THz までを指すことが多い(図2)。テラヘルツ波は、ミリ波(波長 1 ~ 10 mm、周波数 30 ~ 300 GHz) より低い周波数のいわゆる「電波」と、赤外線より高い周波数のいわゆる「光」の、狭間の周波数にあたり、電波と光それぞれで開発された技術や応用が直接的には適用できず、開発や利用が遅れていた周波数帯である。近年、電波及び光の双方のデバイス技術の発展や、それらを組み合わせて活用する技術が向上したことによって、テラヘルツ波を扱うための技術や手段が確立されつつあり、未利用だったテラヘルツ波を利活用する機運が高まっている。テラヘルツ波の応用としては、計測やイメージングの分野での利用が先行して進んでいるが、最近になって無線通信への応用に関して急速に関心が高まっており、積極的に技術開発が進められている。

テラヘルツ波無線通信の応用としては、図3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、筐体間通信(データセンタのサーバ間通信等)、4 K/8 K 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、テラヘルツ波無線通信の特長と、300 GHz 程度の周波数における技術開発及びその標準化活動について述べる。

## 2 テラヘルツ波無線通信の特長

テラヘルツ波を無線通信に用いる最も大きな動機は、情報伝送レートの増大への期待である。前述のように、最近のモバイル無線通信や無線 LAN のトレンドを見ると、1 Gb/s 程度の伝送レートが実用化され、次世代システムに向けて 10 Gb/s 程度が目指されている。無線通信の高速化の需要はとどまることを知らず、更なる将来の無線通信の需要として 100 Gb/s 以上が望まれることは自明である。無線通信の伝送レートを高めるための技術的な手段としては、1) 通信に用いる周波数帯の幅(周波数帯域幅)を広げる、2) データ変復調の「多値」数を増やす、の2つが挙げられる。後者については無線信号の前処理及び後処理における変復調の技術なので、基本的にどの周波数帯の通信においても適用可能であり、特定の周波数についての得失はあまりない。テラヘルツ波にかかる主な期待は、前者の広い周波数帯域幅を利用できる可能性である。無線通信に用いられる電波については、周波数帯ごとの用途の割当てが国際的な規定に基づいて各国が法令で定めているが、現在までに周波数の割当てが定められているのは 275 GHz 以下の周波数までである。275 GHz 以上は確定的な周波数割当てがされておらず、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。

このように、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2つの側面が考えられるが、その一つは、大気吸収

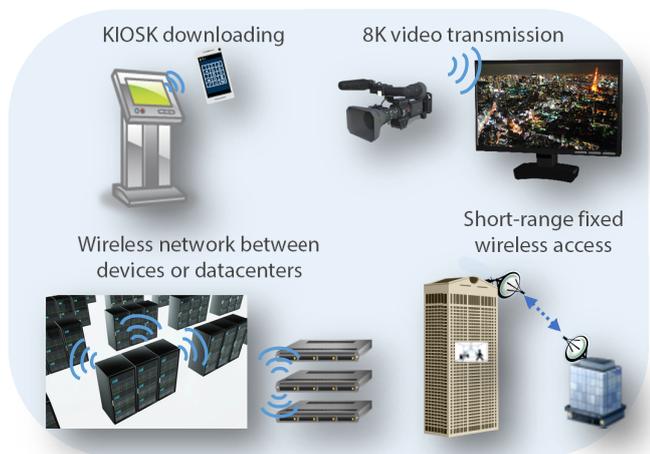


図3 テラヘルツ波無線の応用例

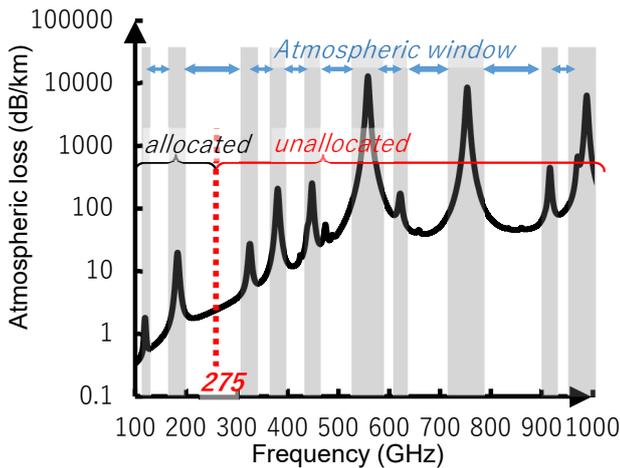


図4 電磁波の大気吸収特性と周波数割当ての状況 (AMATERASU[4] 提供の大気減衰値を基に作成)

特性(図4)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」があり、この帯域を有効に活用すれば数10 GHzから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ての法令において275 GHz以上は確定的な周波数分配がされておらず、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-ハートレイ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対応がしやすくなる面もある。例えば、同じ30 GHz幅の周波数帯を扱うとしても、60 GHz帯では比帯域が50%に達するのに対し、300 GHzでは10%に過ぎない。

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12 dB/km程度であるが、それに比べれば70 GHzから450 GHz程度までの大気の窓は減衰が少なく、300 GHzで3.7 dB/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「伝搬損失が大きい」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も示されている。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ほうが伝搬損失は減少する。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「伝搬損失が大きい」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、300 GHzにおいて送

信電力10 dBm、受信電力-30 dBm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100 mで約42 dBi(理想的な円形開口半径で約20 mm、以下同様)、通信距離1 kmで約53 dBi(約71 mm)である。同様の条件で通信距離100 mの場合、60 GHzで必要なアンテナは約35 dBi(約45 mm)、30 GHzでは約31 dBi(約57 mm)であり、周波数が高いほどアンテナが小型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通り、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わ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づき見通し外への回り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、伝送損失や寄生容量、寄生抵抗等の影響について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キシング技術によって牽引されてきた(例えば、[5]-[8])。フォトミキシング技術では、ある周波数の差をも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。一方、一般に主にコンシューマ用途に利用されている無線通信機器は、トランジスタ素子を中心とした電子回路を用いて高周波信号を電気信号として取り扱っている。これらは、トランジスタ等の能動素子の高性能化や微細集

積化によって、低い周波数から高い周波数に向けて適用範囲を広げてきた。数GHz程度のマイクロ波帯では電子デバイスによる小型高性能の無線通信装置が既に実用化されており、さらに数10GHzでも実用化に向けての研究開発が進んでいる。100GHzを超える周波数帯については、先端的な研究開発において電子デバイスでの無線通信機器の実現が目指されているところである。以下、NICTが進めている電子デバイスによるミリ波・テラヘルツ波の無線通信技術の研究開発について述べる。

### 3.1 化合物半導体デバイスによる 300 GHz 無線通信技術

電子デバイスでのテラヘルツ波通信の取組について、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実施した。2011年度から2015年度にかけて実施された総務省電波資源拡大のための研究開発[9]「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」を、NTT、富士通、NICTの3者で受託し、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を本格的に開始した。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・リン)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(High Electron Mobility Transistor: HEMT)の動作速度や雑音性能を改善して300GHz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、さら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る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を開発した。前節で述べたように、テラヘルツ波を無線通信に用いる利点の一つとして、まだ割当て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、20Gb/s級の伝送速度を達成可能な送信機及び受信機を開発した[10]。特に、受信モジュールはアンテナを含め体積およそ1cm<sup>3</sup>程度と非常に小型である。また、送信機に用い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5のようなタッチダウンロードの実機実験[11]を実施した。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筐体に300GHz帯受信モジュールを

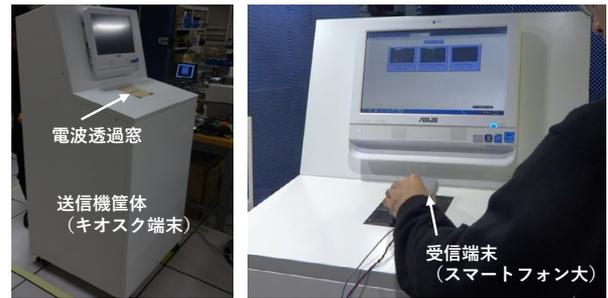


図5 タッチダウンロード実機実験

組み込んだ受信端末を作製し、これらを用いて物理速度20Gb/s、誤り訂正処理も含めた実データ伝送速度として16Gb/sを越える高速ダウンロードを実証した。

### 3.2 シリコンCMOS集積回路による 300 GHz 無線通信技術

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2018年度の5か年で、「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、パナソニック、広島大学、NICTの3者により受託した。

一般に、コンピュータなどの情報機器に用いられるデジタル計算処理回路やメモリ回路は、何万、何億個といった非常に多くのトランジスタを数mm角のシリコン上に作り込む「シリコンCMOS集積回路」技術により作られている。テラヘルツ波を用いる超高速無線通信技術を広く普及させるには、無線通信の回路もシリコンCMOS集積回路技術によって作り、他のデジタル計算処理やメモリ回路と集積・一体化することが望まれる。しかし、シリコンCMOSトランジスタの最大発振周波数(電力増幅率が1となる周波数、 $f_{max}$ )は現状280GHz程度であり、300GHz帯の無線通信搬送波の周波数に達していない。一般的に、 $f_{max}$ より高い帯域では信号増幅ができないことから、シリコンCMOS集積回路では300GHz帯無線通信システムにおいて信号を増幅する回路である増幅器が設計できない。我々は、広島大学 藤島研究室とパナソニック株式会社と共同でこの問題に取り組み、300GHz帯で動作するシリコンCMOS無線送受信機を開発した[12][13]。無線受信機は、無線周波数(RF、ここでは300GHz帯)の電波搬送波を受け取り、情報の復元処理に適した低い周波数に変換している。無線受信信号は微弱であり、信号が小さいままだと雑音に埋もれてしまうため、初めに大きく増幅する必要がある。そのため、一般的な無線受信機では図6(a)に示すように最初に信号を増幅する構成が採用されるが、シリコンCMOS技術では

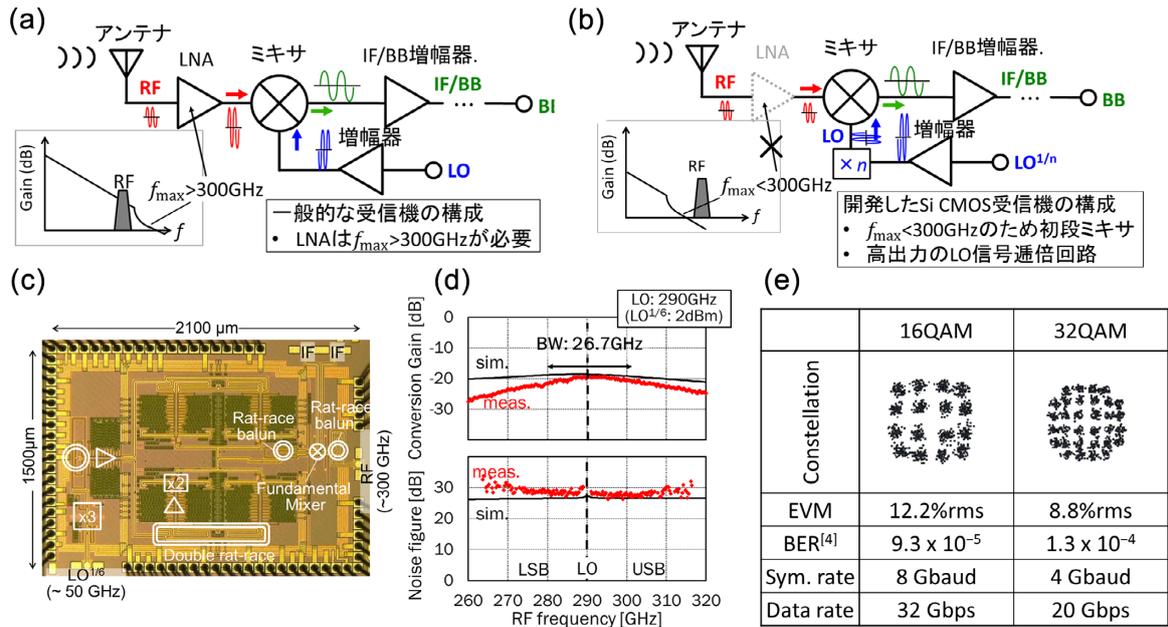


図6 (a)一般的な無線受信機と(b)開発した300 GHzシリコン CMOS 無線受信機の構成、(c)チップ写真と(d)その性能特性、(e)無線通信実験におけるコンスタレーション

$f_{\max}$ の問題により300 GHz帯のRF信号を増幅することができない。そこで我々の手法では、図6(b)のように最初に周波数変換器(ミキサ)を配置する構成を採用した。このミキサはRF信号とその周波数に近い局部発振器(LO)信号を混合して、数GHzの信号に周波数変換している。信号を雑音に埋もれないようにするためには、初段ミキサの雑音指数を下げるのと同時に、変換利得を可能な限り高くする必要があり、300 GHz帯で高い出力のLO信号が必要になる。今回のミキサでは、高出力のLO信号を生成できる通倍回路を開発することで、高い変換利得の受信機を実現した。この際、従来の一般的な通倍回路では変換特性の歪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、高い伝送速度が達成されている。図6(c)の集積回路は、基準線幅40 nmのシリコン CMOS プロセスで製造されており、50 GHz程度の搬送波(LO)と105 Gb/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300 GHzの無線周波数(RF)信号が出力されるものである。図6(d)に得られた変換利得と雑音指数の特性を示す。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6(c)の集積回路写真で窺えるように、それらの特長が生かされている。また同時に開発した300 GHz帯シリコン

CMOS送信機[14][15]と組み合わせて無線通信実験を行い、図6(e)に示すように多値変調方式で32 Gb/sの高速無線通信を実証した。

開発したシリコン CMOS送受信機における300 GHz帯の信号は、回路の最終段で100 ~ 150 GHzの中間周波数(IF)の信号を高い周波数に変換(通倍)することで生成している。シリコン CMOSは300 GHz帯の信号を増幅することができないため、IF帯で高い出力、広帯域・高利得の増幅器が必要になる。増幅器はトランジスタにより構成されるが、1つのトランジスタでは利得と帯域に限界があり、増幅器を多段に縦続接続することにより広帯域化・高利得化が図られる。ただ、縦続接続の各段間では出力と入力のインピーダンスが異なるため、信号の反射や損失を抑えて伝送をスムーズに行うための整合回路が必要になる。従来技術では、この整合回路の面積が肥大化してしまい、開発や製造コストが急激に高くなるが、この問題を解決するために、整合回路を最小寸法まで小型化する回路レイアウト技術を開発した。この技術により増幅器の小型化とともに、高い利得性能と広い帯域を実現できた(図7)。高速無線通信を実証したシリコン CMOS無線送受信機は、この技術とともに、通倍器ミキサ、電力分配器・結合器など新たに開発した多数の回路要素技術を応用することで実現している。

さらに近年、広島大学、パナソニックと共同で、シリコン CMOS集積回路により300 GHz帯を用いて80 Gb/sのデータ伝送を可能にするワンチップトランシーバの開発に世界で初めて成功した(図8)[16]-[18]。従前は送信と受信が別々のシリコンチップになってい

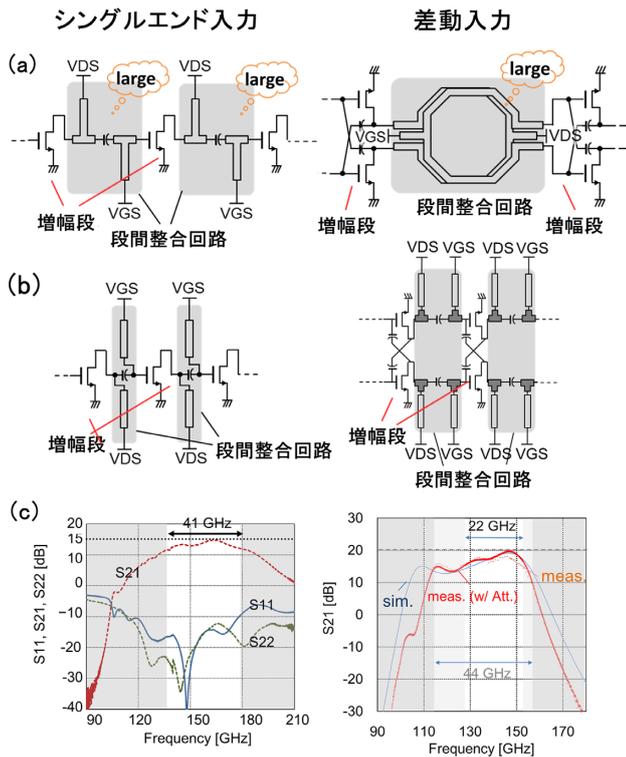


図7 シングルエンド、差動入力増幅器の (a) 従来の段間整合回路と (b) 開発した段間整合回路、(c) 開発した増幅器の小信号特性

たものを、1つのシリコンチップに統合し「ワンチップトランシーバ(送受信)」を実現した。これまで受信回路の性能制限により伝送速度が32 Gb/sにとどまっていたが、受信回路の性能を向上させるとともに、送信回路にも改良を加え、トランシーバとして大幅なデータ伝送速度の向上を達成した。ワンチップ化により、電子機器に搭載する際の部品数の削減とシリコンチップ面積の削減によってコストダウンが可能となり、より実用化に有利となる。従来に比べデータ伝送速度を大幅に向上させるとともに、実用化に必須の「ワンチップ化」を達成したことで、300 GHz帯無線通信の実用化がより近付いたと考えられる。スマートフォンなどで広く用いられている無線トランシーバと同様にシリコン CMOS 集積回路で300 GHz帯を用いた超高

速データ通信が可能となったことにより、2020年から商用サービスが開始されている第5世代移動通信システムの次の世代のシステムである Beyond 5G モバイル通信の無線トランシーバに利用できる可能性が高くなった。

### 3.3 進行波管による 300 GHz 増幅器技術

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100 μW、InPで10 mW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、NEC ネットワーク・センサ株式会社と共同で、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300 GHzで実現するための研究開発が実施された[19][20]。TWTAは、遅波回路と呼ばれる真空中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300 GHz帯に適用するためには、波長が短くなることに対応し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、1 W級の増幅器の実現が目指されている。

## 4 標準化

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、世界無線会議(WRC: World Radiocommunications 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可能な各無線業務への周波数割当て(分配: allocation)が地域ごとに規定されているが、275 GHz以上の周波数帯ではこれまで各無線業務への「分配」が行われておらず、275~1000 GHzの周波数範囲で利用できる電波天文やリモートセンシングといった受動業務応用に対する周波数帯が脚注5.565のなかで「特定」(identification)されているのみであった[21]。「特定」とは、例えば既に移動業務に「分配」されている周波数帯の一部又は全てを特定の移動業務応用(例えば、IMT)にRRの脚注で規定することによって、シームレスに各地域間又は各国間でその無線デバイスを使用できるようにするために主に用いられている。したがって、275 GHz以上の周波数帯に対するグローバルな規定も各無線業務応用に対する「特定」で行われている。2015年のWRC-15に

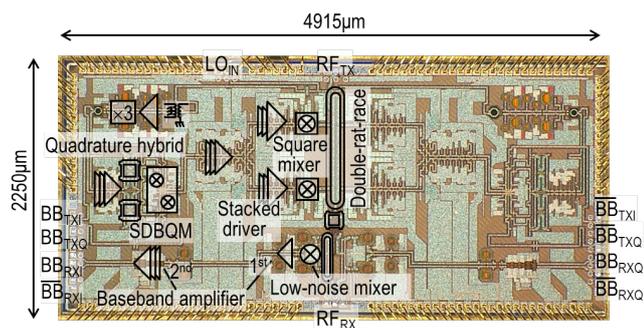


図8 開発した300 GHzワンチップトランシーバ集積回路のシリコンチップ写真

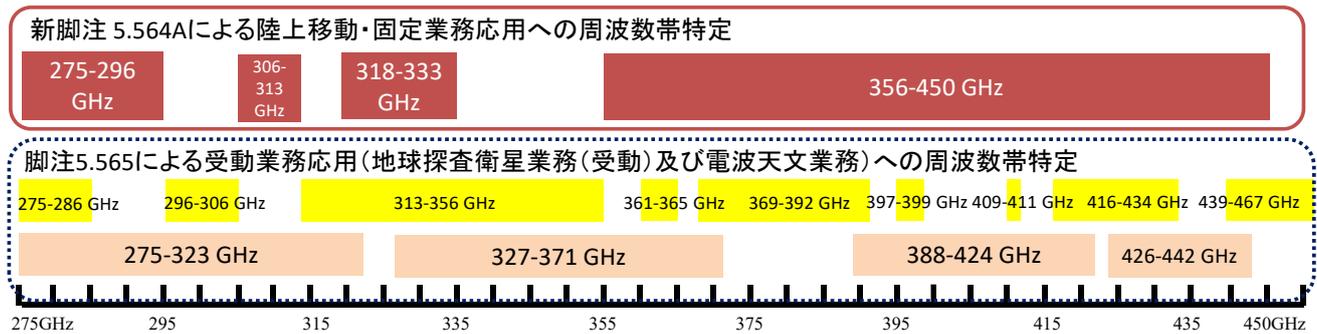


図9 WRC-19で新脚注5.564 Aにて特定された周波数帯と脚注5.565で特定されている受動業務の周波数帯比較

おける将来のRRの改正に向けた議論の結果、2019年の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[22]。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において、NICTなどから提供した技術情報に基づいて日本国からの寄書を多数入力し、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[23][24]、無線信号の屋内伝搬モデル[25]、共用両立性の検討[26]等が行われた。これらの結果を受けて、WRC-19において、275～296GHz、306～313GHz、318～333GHz、356～450GHzを陸上移動業務応用と固定業務応用に特定する新脚注5.564 AがRRに追加された[27]。これまでの脚注5.565は変更なしで維持されており、275～1000GHz帯で特定されている受動業務は能動業務の使用を妨害しない規定になっている。ただし、296～306GHz、313～318GHz、333～356GHzは新脚注5.564 Aにより、共用両立性の可能性が示されるまでは陸上移動業務と固定業務に使用することはできない。WRC-19で新脚注5.564 Aにて特定された周波数帯と脚注5.565で特定されている受動業務の周波数帯比較を図9に示す。

また、無線通信の相互接続仕様で大きな影響力を持つIEEE802委員会(IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee)では、300GHz帯を用いた100Gb/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IEEE802.15.3 d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(物理層)とMAC層(データリンク層)の標準規格が策定され、2017年10月にIEEE Std 802.15.3 dとしてリリースされた[28]。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。ITU-RでのRRの脚注5.564 Aの確定を受けて、IEEE802委員会でもIEEE

Std 802.15.3 dの次期バージョンとして、周波数チャンネルの見直しや、ビームステアリングを含んだ規格の議論が進むと予想される。

## 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長を述べるとともに、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ニクス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ての検討や、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。

テラヘルツ波の特長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、同時に伝搬損失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

本稿で紹介した成果の一部は、総務省電波資源拡大のための研究開発(JPJ000254)の「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、NICT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)による成果が含まれている。本研究開発

を共同で実施した、広島大学(当時含む)の藤島実教授、吉田毅准教授、天川修平准教授、片山光亮先生、高野恭弥先生、李尚擘先生、日本電信電話株式会社の関係皆様、富士通株式会社の関係皆様、パナソニック株式会社の関係皆様に感謝いたします。また、NICTで本研究にご協力いただいた稲垣恵三主任研究員、菅野敦史プランニングマネージャー、沢田浩和主任研究員、関根徳彦室長、諸橋功プランニングマネージャー、藤井勝巳主任研究員、李可人主任研究員に感謝いたします。

**【参考文献】**

- 1 <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/13/15-13-01130-01-0thz-launching-a-study-group-on-thz.pdf>
- 2 Report ITU-R SM.2352 - Technology trends of active services in the band above 275 GHz 2015.
- 3 TG3d Applications Requirements Document (ARD), IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks, IEEE 802.15 Doc Number 14/0304r16.
- 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 Gbp swireless 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. Koosl, 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, 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 photonic 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-Gbps 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/01\\_kiban09\\_02000202.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01_kiban09_02000202.html)
- 12 S. Hara, K. Katayama, K. Takano, R. Dong, I. Watanabe, N. Sekine, A. Kasamatsu, T. Yoshida, S. Amakawa, and M. Fujishima, "A 32Gbit/s 16QAM CMOS Receiver in 300GHz Band," IEEE International Microwave Symposium (IMS2017), pp.1-4, 2017.
- 13 S. Hara, K. Katayama, K. Takano, R. Dong, I. Watanabe, N. Sekine, A. Kasamatsu, T. Yoshida, S. Amakawa, and M. Fujishima, "32-Gbit/s CMOS Receivers in 300GHz Band," IEICE Trans. Electronics, 101-C, no.7, pp.464-471, 2018.
- 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 S. Lee, R. Dong, T. Yoshida, S. Amakawa, S. Hara, A. Kasamatsu, J. Sato, and M. Fujishima, "An 80Gb/s 300GHz-Band Single-Chip CMOS Transceiver," IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2019.

- 17 S. Lee, S. Hara, T. Yoshida, S. Amakawa, R. Dong, A. Kasamatsu, J. Sato, and M. Fujishima, "An 80Gb/s 300GHz-Band Single-Chip CMOS Transceiver," IEEE J. Solid-State Circuits, vol.54, no.12, pp.3577-3588, 2019.
- 18 報道発表「毎秒 80 ギガビットのデータ伝送を可能にするシリコン CMOS 集積回路を用いた 300 ギガヘルツ帯ワンチップトランシーバの開発に成功」, <https://www.nict.go.jp/press/2019/02/19-1.html>, 2019年2月19日
- 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, 竇迫巖, "テラヘルツ波電力モジュール," MWE2017 ダイジェスト, TH3A-3, 2017年11月
- 21 Radio Regulations, Footnote 5.565 (<https://www.itu.int/pub/R-REG-RR/en>等から入手可) 2016.
- 22 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" 2015.
- 23 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" 2017.
- 24 Report ITU-R M.2417-0, "Technical and operational characteristics of land-mobile service applications in the frequency range 275-450 GHz" 2017.
- 25 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" 2017.
- 26 Report ITU-R SM.2450-0, "Sharing and compatibility studies between land-mobile, fixed and passive services in the frequency range 275-450 GHz" 2019.
- 27 World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19) Final Acts
- 28 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," <https://ieeexplore.ieee.org/document/8066476>



**笠松章史 (かさまつ あきふみ)**

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)  
ミリ波・テラヘルツ無線技術、ミリ波・テラヘルツ電子デバイス



**原 紳介 (はら しんすけ)**

未来 ICT 研究所  
フロンティア創造総合研究室  
主任研究員  
博士(理学)  
ミリ波・テラヘルツ波集積回路、ミリ波・テラヘルツ波電子デバイス



**董 鋭冰 (どん るいびん)**

未来 ICT 研究所  
フロンティア創造総合研究室  
研究員  
博士(工学)  
ミリ波・テラヘルツ集積回路



**渡邊一世** (わたなべ いっせい)

未来 ICT 研究所  
フロンティア創造総合研究室  
主任研究員  
博士(工学)  
超高周波電子デバイス・集積回路、高周波計測  
半導体結晶成長



**小川博世** (おがわ ひろよ)

ソーシャルイノベーションユニットテラヘルツ研究センター  
テラヘルツ連携研究室  
研究技術員  
博士(工学)  
ミリ波・テラヘルツ波無線システムのスペクトラム標準



**竇迫 巖** (ほうさこ いわお)

ソーシャルイノベーションユニットテラヘルツ研究センター  
研究センター長  
博士(理学)  
テラヘルツ技術、デバイス工学、固体物理