



6Gに向けたテラヘルツ波通信技術の動向

国立研究開発法人情報通信研究機構
ワイヤレスネットワーク総合研究センター 研究センター長

ほうさこ いわお
寶迫 巖



1. はじめに

2019年末に端を発したCOVID-19によるパンデミックによって、多くの人々がサイバー空間を通じたコミュニケーション手段を使わざるを得ない状況になった。それ以前は手段としてはあるけれどもあまり利用していなかった様々なリモート会議システム等を活用することを迫られ、実際に否応なしに利用したわけである。そのような状況がしばらく続きリモートワーク、リモート会議、リモート授業等は当たり前になってきた。この状況には多くの利点があることに人々は気が付いたと思う。つまり会合点がサイバー空間になったため、時空を超えてある会合点から別の会合点へ瞬時に移動できる。さらに会合点の容量は実空間に比べてはるかに大きいので、参加人数の制限を大幅に緩和することも可能である。仕事をするにしても余暇を楽しむにしてもこれまで以上にチャンスが増えたともいえる。一方で現状は決して十分でないことも人々の共通認識となっている。一言でいうならば、現在の臨場感に乏しく、実空間で実際に会ったり会話したりするのは全く異なっているという部分である。この点は技術分野においては、帯域や接続ポイントの数、そしてヒューマンインタフェースの質が十分でないこととあって良いと思う。このような点は、現在進みつつある第5世代移動体通信システム(5G)の普及によってある程度は解決すると考えられる。

これまでの移動体通信システムの進化には目覚ましいものがある。通信インフラ(第1世代(1G)~3G)から始まり、情報インフラ(4G)になり、個人の生活に欠かせない要素となった。2020年頃から利用できるようになった5Gでは、人だけでなくモノとモノをつなぐ社会インフラとしての機能が備わっている。DXの推進に伴い、人と人、人とモノ、モノとモノの相互作用が、社会生活の様々な場面で大きな意味を持つようになるはずだ。すなわち移動体通信システムを支えるコアネットワーク、ネットワーク上のサーバー、そしてそれらが織りなすサイバー空間を介した様々な相互作用は、実空間とサイバー空間の両側にまたがった形で実行される。この姿は実空間とサイバー空間が有機的に統合したサイバーフィジカルシステムと捉えることができる。このサイバーフィジカルシステムの進展がこれからは重要になってくる。

2. テラヘルツと6G白書と海外動向

5G社会実装は始まったばかりだが、既に次の世代の6Gの開発競争が始まっている。社会インフラとなった情報通信網は、未来社会の神経網として極めて重要な位置を占めることが明確になったためである。2019年ごろより世界各国の研究機関、大学、携帯事業者等から6G白書^[1]が数多く出版されている。6Gを目指した研究開発投資が行われ始め、6Gの実現を目指すコンソーシアム^[2]が設立されるなどしている。白書の中では6Gのあるべき姿として、まずは5Gの3つのネットワークスライスの高度化、すなわち、更なる「高速・大容量」・「低遅延」・「同時多数接続」を目指すとしている。これに加えて、「安全性・信頼性」、「拡張性」、「自律性」、「超低消費電力化」が必要となるとしている。「高速・大容量」ではアクセス速度として5Gの10倍といった目標が掲げられており、ここにより高い周波数帯であるテラヘルツ帯を用い広い帯域幅を使って実現するというシナリオが掲げられている。このような高速アクセスを支えるためコアネットワークの通信速度を現在の100倍程度とする必要もある。アクセス速度の向上は、ユーザー端末における高品質動画ストリーミング伝送、大容量画像データのアップロードなどに寄与しユーザー体験を大幅に向上することにもつながる。この点もテラヘルツ帯を使うことへの動機として挙げられる。

3. テラヘルツとは(無線通信の場合)

電波法^[3]では、「電波」とは、「三百万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう。」と電波の範囲が定義されている。三百万メガヘルツはすなわち3THzになる。3THz以下の電磁波は、300GHz~3THzがサブミリ波、30GHz~300GHzがミリ波と呼ばれている。一方でテラヘルツ帯とは100GHz(0.1THz)~10THzの電磁波を指す言葉として使われることが多い。このため混乱することも多いのだが、ここでは100GHz~10THzの電磁波をテラヘルツ帯として話を進める。

周波数が高くなると自由空間伝搬損が大きくなる。さらに分子吸収線が多く吸収線近傍では極めて大きな吸収がある。1km当たりの大気吸収と自由空間伝搬損(FSPL)、そして

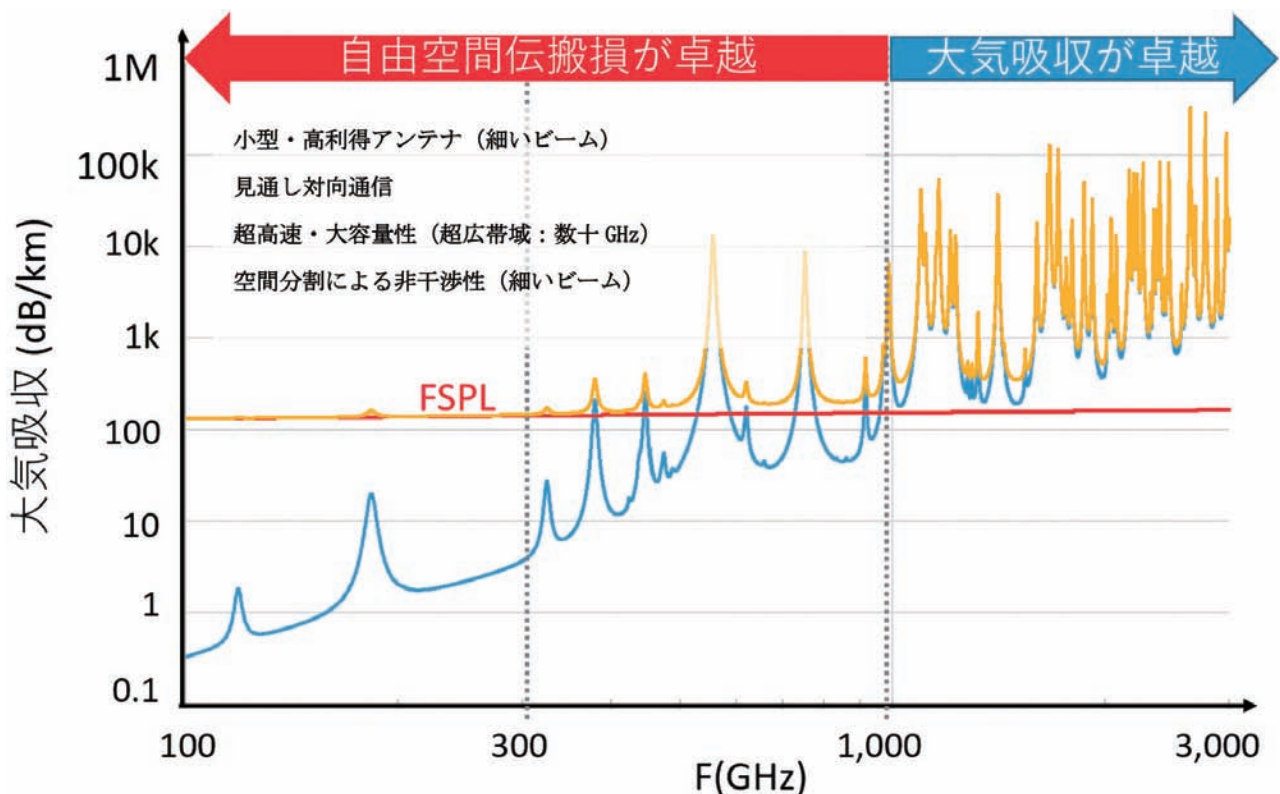


それらの和を図に示す。およそ1THzを境にして、それよりも大きな周波数では大気吸収が卓越している。1THz以下の周波数帯では自由空間伝搬損が卓越しており、従来の無線通信とその点においては変わらない。降雨減衰^[4]は150mm/hという土砂降りの条件でおよそ50dB/km (100GHz-1THz)と大きな値になっている。アメダス^[5]のデータによると80mm/h以上の降雨は1300地点当たり年間20回程度となっており、その頻度はそれほど高くないが、システムを検討する際には重要な点である。

周波数が高くなると小さなアンテナで大きなアンテナ利得を持つものが実現できる。例えば300GHzの標準ホーンアンテナでは、開口は8mm×6mm程度ですが25dBiと高い利得がある。この時の3dBビーム幅は9°と狭くなる。さらに人の生活空間の大きさ程度の空間で見た場合、回折現象は無視できる程度であるため、建物や人の影となる部分には電波は届かない。以上から、テラヘルツ帯での無線通信の特徴は、小さな高利得アンテナによる細いビームを用いた近距離の見通し対向通信であるといえる。この点は空間分割(細いビーム)によって比較的近距離であっても同じ周波数を繰り返し使うことができるといった特徴にもつな

がる。

2019年の世界無線会議(WRC-19)において275GHz-450GHzの全137GHz(275-296GHz、306-313GHz、318-333GHz、356-450GHz)が固定無線と陸上移動無線に特定された。この結果は無線規則(脚注5.564A)^[6]に反映されている。275GHzの直下には既に固定無線と陸上移動無線に割り当てられている帯域252-275GHzがあり、これと併せて252-296GHzの連続44GHzもの帯域が利用できるようになった。252-296GHzの帯域では、大量生産した場合にコストが著しく小さくできる可能性があるシリコンCMOSデバイスを利用できる可能性がある点は、コンシューマ用途の無線を検討する場合に重要である。このように極めて広い帯域が連続して使えることは、超高速性や大容量性に直接結びつく重要な要素である。単純なアナロジーとしては、5Gで400MHzを使って10Gbit/sの通信速度が実現できていることを根拠とすれば、同様に考えて44GHzを使えば1.1Tbit/sが実現できることになる。もちろん実際はこのように単純ではないが、極めて広い連続した帯域が使えるようになった点は、テラヘルツ帯での無線通信の大きな特徴である。



■図. テラヘルツ帯の特徴(無線通信の場合)



米国の連邦通信委員会 (FCC) は2019年3月に95GHz-3THzのテラヘルツ帯を実験用に簡単な申請で最大10年間利用可能な免許を交付できるとする発表^[7]を行っている。6Gに向けたテラヘルツ帯開拓を目指した政策として注目に値するものといえ、日本においても同様な政策を行い、国際競争力を高めていく必要がある。

国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) では、高周波電磁界 (RF) にばく露されている人を保護するため電磁界へのばく露を制限するためのガイドライン^[8]を定めている。このガイドラインは2020年に改訂され対象とする周波数範囲は100kHz-300GHzである。WRC-19で特定化された周波数帯も一部含まれているので、機器開発を行うに当たっての指針として有用である。

4. テラヘルツ帯を用いる初めてのデファクト標準 (IEEE802.15.3d)

“IEEE 802.15.3d-2017-IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks Amendment 2: 100Gb/s Wireless Switched Point-to-Point Physical Layer (IEEE 802.15.3d)”^{[9][10]}は、Bluetooth (IEEE 802.15.1) 等を定めてきたIEEE 802.15ワーキンググループにおいて議論が行われ2017年9月に採択されたデファクト標準である。IEEE 802.15.3dではスイッチド・ポイント・ツー・ポイント・リンクのための252GHzから325GHzまでの低いTHz周波数帯の代替物理層 (PHY) が定義されている。2.16GHzから69.12GHzの間の8つの異なる帯域幅を使用して、最大100Gbit/sのデータレートを可能にする2つの物理モード (THz-SC PHY、THz-OOK-PHY)、3つのチャンネル符号化 (14/15-rate LDPC (1440, 1344)、11/14-rate LDPC (1440, 1056)、11/14-rate RS (240, 224))、7つの変調方式 (BPSK、QPSK、8-PSK、8-APSK、16-QAM、64QAM、OOK) が定義されている。対象としているユースケースは、キオスクダウンロード (KIOSK-DL)、デバイス間通信 (Intra-Device)、データセンター内の通信 (Data Center)、モバイルフロントホール/バックホール (Front/Back-haul) の5つである。通信距離はKIOSK-DLの数cmからFront/Back-haulの1km程度までとなっている。これらのユースケースは、総務省電波資源拡大のための研究開発 (KIOSK-DLとIntra-Device)^[11]、欧州委員会Horizon 2020のNetworking research beyond 5G (ICT-09-2017) の中の1つのプロジェクトTERAPOD (Data Center)^[12]、日欧共同公募第4弾の研究開発の中の1つのプ

ロジェクトTHOR (Front/Back-haul)^[13]によりすべて網羅され、その実現可能性がデバイス技術的、システム的にも検証されるなどしてきた。

IEEE802.15.3d-2017のチャンネルプランは、上述のWRC-19の結果と必ずしも一致していない。2021年3月のIEEE 802の会合において、この点について議論された。IEEE802.15.3d-2017のチャンネルプランを変更することはしないが、実質的にはWRC-19の結果によりマスクされるということITU-Rへのリエゾン文書の中で確認^[14]している。

5. これからの方向性 (まとめに代えて)

6Gの新しい周波数帯候補という明確な目標が各白書等で示され、各国において様々な研究助成が行われている。無線規則では広い周波数帯が特定され、電波防護指針も整ってきたところである。少なくとも1つのデファクト標準があり、それに基づいた実現可能性が示されてきた。デバイス技術も化合物半導体デバイスのみならずシリコンCMOSなども利用可能な状況になりつつある。さらにパンデミックのためにリモート会議等を体験した人々は、ユーザー体験の大幅な向上に期待を寄せている。このようにテラヘルツ帯無線を実用化するための素地は、およそ整った状況にある。5Gではおよそ100GHz以下の周波数帯が候補となりいくつかの周波数帯は実際に利用されることとなった。これまでに述べた様々な境界条件から考えると6Gでの候補周波数帯は100GHz-300GHzの範囲にあるといっても良さそうだ。IEEE802.15.3dはシングルキャリア (SC) モードのポイント・ツー・ポイント・リンクだったが、今後IEEE802.11や3GPPにおいて、マルチキャリアモード、ポイント・ツー・マルチポイント・リンクであってビーム制御の加わった標準が議論されて行くことになると思われる。日本はこれまでデジュール標準、デファクト標準、デバイス開発においてテラヘルツ帯無線の開拓を主導してきた。この経験を活かし、これからもテラヘルツ帯無線の研究開発を主導するのみならず、市場をも主導して行くことが望まれる。

(2021年2月4日 ITU-R研究会より)

参考文献

[1] 6G白書等

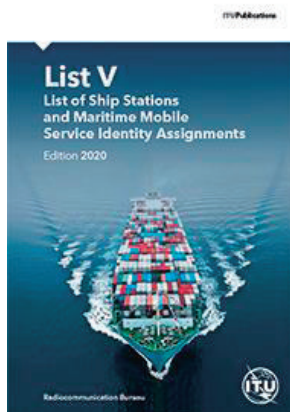
●総務省Beyond 5G推進戦略懇談会

https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html



- NTTの「IOWN」構想
<https://www.rd.ntt/iown/>
 - DoCoMoの「ドコモ6Gホワイトペーパー」
https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/
 - KDDIの「Accelerate 5.0」
https://biz.kddi.com/accelerate5_0/
 - NECの「Beyond 5Gビジョンホワイトペーパー」
https://jpn.nec.com/nsp/5g/beyond5g/pdf/NEC_B5G_WhitePaper_1.0.pdf
 - Samsungの「The Next Hyper-Connected Experience for All」
https://cdn.codeground.org/nsr/downloads/researchareas/20201201_6G_Vision_web.pdf
 - Oulu大学「6G channel」
<https://www.6gchannel.com/>
<https://www.6gchannel.com/portfolio-posts/6g-white-paper-validation-trials/>
- [2] コンソーシアム
- Beyond 5G推進コンソーシアム
 Home Beyond 5G推進コンソーシアム (b5g.jp)
 - NEXT G ALLIANCE
<https://nextgalliance.org/>
- [3] 電波法 : <https://elaws.e-gov.go.jp/>
 - [4] 降雨減衰 : FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION OFFICE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY Bulletin Number 70 July, 1997 Millimeter Wave Propagation : Spectrum Management Implications
 - [5] アメダス : www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html
 - [6] 無線規則 : <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR/en>
 - [7] FCC : <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-356588A1.pdf>
 - [8] ICNIRPガイドライン : <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf>
 - [9] IEEE 802.15.3d-2017 : https://standards.ieee.org/standard/802_15_3d-2017.html
 - [10] IEEE 802.15.3d-2017の解説記事 : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9269931>
 - [11] 総務省電波資源拡大のための研究開発 : <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/>
 - [12] TERAPOD : <https://terapod-project.eu/>
 - [13] THOR : <https://thorproject.eu/>
 - [14] IEEE802.15 SC-THzの文書 : <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/21/15-21-0122-02-0thz-liaison-statement-to-itu-r-wp5a.docx>

国際航海を行う船舶局に必須の書類 好評発売中！



船舶局局名録 2020年版



海岸局局名録 2019年版

海上移動業務及び 海上移動衛星業務で使用する便覧 2020年版

お問い合わせ : hanbaitosho@ituaj.jp

